



**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUÍZ GALLO**

***FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y***

***MATEMÁTICAS***

**ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA**



**TESIS**

***“Detección de área cultivables de arroz, en la cuenca  
Chancay-Lambayeque, intercuenca 137771: periodo 2001-  
2014, utilizando imágenes de satélites y datos conductividad eléctrica del suelo”***

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**LICENCIADO EN FÍSICA**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. Fís. Sigueñas Cajusol, Rodrigo Paúl**

**Bach. Fís. Namuche Sánchez, Jhon Nelson**

**LAMBAYEQUE – PERÚ**

**ENERO – 2018**



**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUÍZ GALLO**

***FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y  
MATEMÁTICAS***

**ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA**

**TESIS**

***“Detección de área cultivables de arroz, en la cuenca  
Chancay-Lambayeque, intercuenca 137771: periodo 2001-  
2014, utilizando imágenes de satélites y datos  
conductividad eléctrica del suelo”***

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
LICENCIADO EN FÍSICA**

**SUSTENTADA Y APROBADA ANTE EL SIGUIENTE JURADO:**

---

**Ing. ADOLFO ROMÁN RISCO VELEZ  
PRESIDENTE**

---

**Mg. Ing. JACINTO GUILLERMO UCEDA PISFIL  
SECRETARIO**

---

**Lic. Fís. JESÚS LUZGARDO LOZANO ALVARADO  
VOCAL**

---

**Mg. JORGE LUIS CALDERÓN BACON  
ASESOR**





**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUÍZ GALLO**

***FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y  
MATEMÁTICAS***

**ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA**



**TESIS**

***“Detección de área cultivables de arroz, en la cuenca  
Chancay-Lambayeque, intercuenca 137771: periodo 2001-  
2014, utilizando imágenes de satélites y datos  
conductividad eléctrica del suelo”***

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
LICENCIADO EN FÍSICA**

---

**Bach. Fís. Sigueñas Cajusol, Rodrigo Paúl**

---

**Bach. Fís. Namuche Sánchez, Jhon Nelson**

## **Dedicatoria**

### **Rodrigo Paúl Sigueñas Cajusol**

*A mis padres **Humberto Sigueñas Roalcaba** y **María Cajusol Cuza** que me dieron la vida, y un ejemplo de lucha constante contra las adversidades. Agradezco su incondicional apoyo y paciencia.*

*A mis hermanos, porque nos une un gran sentimiento.*

*A mi familia, por darme la fuerza necesaria para salir adelante en situaciones difíciles, en particular a mi hermana **Diana Elisabeth Sigueñas Cajusol**, por ser la persona más especial e importante que Dios nos dio.*

### **Jhon Namuche Sánchez**

*Dedicado a mis padres **Santos Namuche Cueva** y **Rosa Sánchez Popuche**, porque su apoyo y esfuerzo hicieron que culminara con éxito la carrera profesional, gracias por sus enseñanzas y valores impartidos.*

*A mis hermanos, porque nos une un mismo sentimiento y como no, a un gran amigo y maestro de escuela, **Pedro Yovera Chapoñan**, por su apoyo incondicional cuando más lo requería y por sus buenos ánimos.*

## **Agradecimientos**

Al Mg. Jorge Calderón Bacon, asesor de esta tesis, por su acertada orientación y sugerencias.

El autor agradece al laboratorio de Teledetección (LABTEL) - Facultad de Ciencias Físicas - UNMSM, por la formación brindada, **Mg. Jhon Brayan Guerrero Salinas y Mg. Rolando Rene Badaracco Meza**, por sus enseñanzas, sugerencias e incondicional apoyo durante el desarrollo de la presente tesis.

A mi amigo, Lic. Pedro Yovera Chapoñan, por su apoyo y sugerencias en el desarrollo de esta investigación.

Al personal del Laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo”, por la ayuda y orientación recibida en el desarrollo del análisis de cada una de las muestras de suelos obtenidas en campo.

A los profesores de la Escuela Profesional de Física de la Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo”, por la formación impartida que permitió ver realizado mi objetivo principal, la de ser un profesional al servicio de la sociedad.

## Índice

<b>Lista de figuras</b> .....	VI
<b>Lista de tablas</b> .....	XV
<b>Acrónimos</b> .....	XVII
<b>I. Resumen</b> .....	1
<b>II. Introducción</b> .....	4
2.1 Problema: .....	4
2.2. Objetivos .....	4
2.2.1. Objetivo general: .....	5
2.2.2. Objetivos específicos:.....	5
2.3. Importancia.....	5
2.4. Antecedentes .....	6
2.5. Justificación.....	9
2.6. Hipótesis.....	10
2.7. Área de estudio.....	10
2.7.1. Plano Geodésico de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771. ....	10
2.7.2. Área de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771.....	13
2.7.3. Clima .....	13
2.7.4. Relieve .....	13
2.7.5. Hidrografía.....	14
2.7.6. Actividades .....	14
2.7.6.1. Cultivos de arroz en la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771. ....	14
2.7.6.2. Inicio y fin de los cultivos de arroz en la Intercuenca 137771 .....	15
<b>III. Marco teórico</b> .....	17
3.1. Fundamento físico de teledetección .....	17
3.1.1. Radiación electromagnética (REM) .....	19

3.1.2. Espectro electromagnético (EEM).....	21
3.1.3. Absorción espectral .....	22
3.1.4. Scattering Atmosférico .....	27
3.1.5. Emisividad Atmosférica .....	27
3.1.6. Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera .....	29
3.1.6.1. Scattering de Rayleigh .....	29
3.1.6.2. Scattering de Mie .....	29
3.1.6.3. Scattering no selectivo .....	30
3.1.7. Efecto atmosférico en la obtención de imágenes de satélite .....	30
3.1.7.1. Irradiancia (E) .....	30
3.1.7.1.1. Irradiancia directa ( Edir ) .....	31
3.1.7.1.2. Irradiancia difusa ( Edif ).....	31
3.1.7.1.3. Irradiancia del entorno (Eenv ).....	32
3.1.7.2. Radiancia (L) .....	32
3.1.7.2.1. Radiancia directa (Lpix) .....	33
3.1.7.2.2. Radiancia directa proveniente de la atmósfera ( Latm ).....	33
3.1.7.2.3. Radiancia proveniente del entorno ( Lenv ).....	33
3.1.7.3. Reflectancia.....	34
3.2. La imagen de satélite .....	34
3.2.1. Formatos de imágenes multiespectrales .....	35
3.2.1.1. Bandas secuenciales (BSQ): .....	37
3.2.1.2. Bandas Intercaladas por Línea (BIL):.....	37
3.2.1.3. Bandas Intercaladas por Pixel (BIP):.....	37
<b>IV Materiales y métodos.....</b>	<b>40</b>
4.1. Imágenes del sensor ETM+ a bordo del satélite LandSat-7.....	40
4.2. Características generales de las imágenes LandSat.....	42
4.3. Procesamiento de imágenes del sensor ETM+ a bordo del satélite LandSat-7.....	44
4.3.1. Calibración radiométrica de las imágenes del sensor ETM+ .....	45
4.3.1.1. Conversión de radiancia a reflectancia planetaria en imágenes del sensor ETM+.....	48

4.3.1.2. Corrección atmosférica mediante el módulo FLAASH.....	49
4.3.1.3. Requerimientos del módulo FLAASH.....	50
4.3.1.4. Metadato de una imagen del sensor ETM+ a bordo del satélite LandSat-7 .....	52
4.4. Imágenes MODIS.....	58
4.4.1. Procesamiento de Imágenes MODIS.....	58
4.4.2. Módulo “MODIS Conversion Toolkit” .....	59
4.4.3. Obtención de datos imágenes MODIS Nivel 4 usando el módulo MCTK .....	60
4.5. Medida de la conductividad eléctrica del suelo .....	62
4.5.1. Datos de campo .....	64
4.5.1.1. Datos de conductividad eléctrica del suelo.....	65
4.5.1.2. Procedimiento para medir la conductividad eléctrica en el laboratorio a partir de las muestras de suelo extraídas de las parcelas de cultivos de arroz. ....	75
4.5.1.3. Modelo numérico para obtener en forma aproximada la cantidad de carga eléctrica del suelo en cada una de las muestras obtenidas. ....	77
4.6. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) .....	79
4.7. Desviación estándar de imágenes satelitales .....	82
4.8. Máximo Valor Compuesto de 25 imágenes (ETM+) de NDVI periodo 2001 a 2014 .....	82
4.9. Metodología .....	83
<b>V. Resultados y discusiones .....</b>	<b>84</b>
5.1. Firma espectral de cultivos de arroz en diferentes estados de salud .....	84
5.2. Análisis de datos NDVI de imágenes MODIS .....	87
5.2.1. Limpieza de datos NDVI del sensor MODIS .....	88
5.3 Identificación de áreas adaptadas para el cultivo de arroz .....	91
5.4. Estacionalidad de cultivos de arroz en la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771 .....	92
5.5. Máximo Valor Compuesto de 25 imágenes de NDVI del sensor ETM+/LandSat-7 periodo 2001-2014 de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771 .....	94



5.5.1. Máximo Valor Compuesto de NDVI del sensor MODIS periodo 2001-2014 de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771 .....	97
5.5.2. Dinámica interanual de los cultivos de arroz mediante el NDVI, en el periodo 2001-2014 .....	98
5.6. Análisis de la variabilidad espacial del NDVI representado en la desviación estándar para el periodo 2001 a 2014.....	100
5.7. Estimación de la conductividad eléctrica a partir de los valores de reflectancia espectral de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 de la imagen del sensor ETM+ del satélite LandSat-7 de fecha 20/11/2007 .....	110
5.7.1. Extracción de los valores de reflectancia espectral para cada una de las bandas a partir de las coordenadas de cada una de las muestras de campo .....	110
5.7.2. Modelos de regresión lineal simple entre la CE del suelo frente a los valores de reflectancia espectral de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 del sensor ETM+ .....	111
5.7.3. Modelos de regresión lineal múltiple de la CE del suelo vs valores de reflectancia espectral del suelo, de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 del sensor ETM+ .....	116
5.8. Distribución espacial de la conductividad eléctrica del suelo en la Cuenca Chancay Lambayeque, Intercuenca 137771.....	117
5.9. Análisis de la variación temporal del NDVI del sensor MODIS para cada uno de los distritos pertenecientes a la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771 .....	124
5.10. Análisis estadístico de las áreas obtenidas mediante los valores de conductividad eléctrica del suelo, desviación estándar y datos de campo del Ministerio de Agricultura .....	144
5.11. Modelo de un sistema operacional de la variación temporal y espacial de las áreas de cultivos de arroz .....	146
5.11.1. Modelo operacional de vigilancia.....	146
5.12. Sensibilidad de los cultivos de arroz relacionados a la sequía en la costa norte .....	149
<b>VI. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>151</b>
6.1. Conclusiones .....	151
6.2. Recomendaciones.....	153

<b>VII. Referencias bibliográficas .....</b>	<b>153</b>
<b>VIII. Anexos.....</b>	<b>157</b>
Anexo A. Máximo Valor Compuesto y Mínimo Valor Compuesto de imágenes .....	157
Anexo B. Modelo de Elevación Digital (DEM) de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771 .....	158
Anexo C. Datos In-situ de la producción, rendimiento y superficie cosechada de cultivos de arroz.....	162
Anexo D. Valores de reflectancia espectral de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 de la imagen ETM+ 20/11/2007 .....	164
Anexo E programas para el procesamiento de imágenes satelitales .....	167

## Lista de figuras

- Figura 2. 1.** En color verde se muestra el área de estudio, la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771..... **11**
- Figura 2. 2.** En color verde se muestra el plano geodésico, de la intercuenca 137771..... **12**
- Figura 3. 1.** Procedimiento para la obtención de las imágenes satelitales y su utilización. La fuente principal de energía que utilizan los sensores pasivos como MODIS, ETM, SPOT, etc., es el Sol. El paso de esta radiación se da en dos etapas: Fuente (Sol) – objeto (superficie del suelo) y Objeto – Sensor (plataforma satelital donde se encuentran ubicados los sensores que captan dicha radiación proveniente de la superficie del suelo). Fuente: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-9/landsat-9-spectral-bands/> [Acceso 13-12-2018]... **18**
- Figura 3. 2.** Espectro electromagnético. Fuente: Adaptado de Sobrino, 2000. .... **22**
- Figura 3. 3.** Radiación solar exoatmosférica y en la superficie terrestre. Fuente: Adaptado de Thomas y Stamnes, 1999. .... **23**
- Figura 3. 4.** Presenta las bandas de transmisión atmosférica. Dichas bandas corresponden a una región del espectro electromagnético donde los sensores han sido diseñados para obtener información de la superficie sin ningún tipo de interferencias, porque la transmitividad en estas regiones, es alta. En la Figura se puede observar que los sensores OLI-TIRS presentan una mayor cantidad de bandas en ciertas regiones del espectro electromagnético, más que el sensor ETM+, con la cual se permite una mejor discriminación de los fenómenos que ocurren en la superficie terrestre. Fuente: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-9/landsat-9-spectral-bands/> [Acceso 13-12-2018]. .... **25**
- Figura 3. 5.** Presenta las bandas de absorción atmosférica. Dichas bandas corresponden a una región del espectro electromagnético donde los sensores han sido diseñados para obtener información de la superficie sin ningún tipo de interferencias, porque la transmitividad en estas regiones, es alta. En la Figura se puede observar que los sensores VIIRS presentan una mayor cantidad de bandas que el sensor MODIS, con la cual permite una mejor discriminación de los fenómenos que ocurren en la cubierta de la superficie terrestre. Fuente:

<a href="https://arset.gsfc.nasa.gov/webinars/fundamentals-remote-sensing">https://arset.gsfc.nasa.gov/webinars/fundamentals-remote-sensing</a> [Acceso 13-01-2019] .....	26
<b>Figura 3. 6.</b> Distribución espectral de los campos Solar (longitud de Onda corta) y Terrestre (longitud de Onda larga). También se muestran las formas y posiciones aproximadas de las características de scattering y absorción de la atmósfera Terrestre. Fuente: Adaptado de Thomas y Stamnes, 1999 .....	28
<b>Figura 3. 7.</b> El flujo radiante por unidad de área incidente en un punto de una superficie. Fuente: Adoptado de Frulla (1993). .....	31
<b>Figura 3. 8.</b> Las tres componentes de la Irradiancia: directa, difusa y del entorno. ....	32
<b>Figura 3. 9.</b> Los tres componentes de la Radiancia: directa, de la atmósfera y del medio ambiente. Fuente: Adoptado de Frulla (1993) .....	34
<b>Figura 3. 10.</b> Representación del formato de almacenamiento de valores digitales en una imagen multispectral. Los colores representan a cada una de las bandas con sus respectivos rangos de longitudes de onda, incrementándose el valor de la longitud de onda de acuerdo al número de banda establecida. Fuente: Adaptado de Sobrino, 2000. ....	36
<b>Figura 3. 11.</b> Representación de una matriz de 8x6 pixeles para cada una de las bandas, obtenidas de una imagen multispectral debidamente procesada mediante el software de procesamiento de imágenes satelitales ENVI y el lenguaje de programación IDL. En cada una de las matrices se especifica la procedencia, la fecha y la posición de un pixel en la matriz de la imagen multispectral inicial, tomado como referencia para las otras bandas. ....	38
<b>Figura 3. 12.</b> Formato BSQ. ....	39
<b>Figura 3. 13.</b> Formato BIL. ....	39
<b>Figura 3. 14.</b> Formato BIP. ....	39
<b>Figura 4. 1.</b> Representación gráfica de $L\lambda$ Radiancia vs ND. ....	45
<b>Figura 4. 2.</b> Factor de escala para realizar el cambio de unidades de la imagen a clasificar (Chander et al., 2009) .....	51
<b>Figura 4. 3.</b> Información necesaria para realizar una corrección atmosférica por el modelo FLAASH del software ENVI 5.1. ....	52

- Figura 4. 4.** Ventana del entorno de trabajo del MCTK. Las opciones correspondientes se actualizan cuando se carguen los archivos del producto MODIS. .... 60
- Figura 4. 5.** MCTK con un archivo de procesamiento HDF Nivel 4 (Producto de NDVI) suministrado..... 61
- Figura 4. 6.** MCTK con un archivo de procesamiento HDF Nivel 4 (Producto de NDVI) suministrado. Se muestra un conjunto de datos con diferentes dimensiones y resoluciones espaciales. .... 62
- Figura 4. 7.** Obtención de muestras de campo debidamente georreferenciados en áreas de cultivo de arroz. Figura 4.7. A, en la figura se genera una pequeña calicata hasta una profundidad de 30 cm, porque a esta profundidad se encuentra la zona de raíz de los cultivos de arroz. .... 66
- Figura 4. 8.** En la Figura B, se procede a georreferenciar con un GPS en el sistema WGS84 cuya posición en coordenadas UTM son: (E 615870 m – N 9261408);  $\pm 3$  m de error del equipo GPS. La Figura 4. 8. C, se extrajo aproximadamente 2 kg de muestra debidamente etiquetada, en bolsas de plástico totalmente selladas de tal manera que se conserve el estado natural de la muestra, luego se trasladó al Laboratorio de Suelos de la UNPRG, para su análisis correspondiente. En este trabajo de campo realizado en la Fecha 02/08/2015 y se obtuvieron 20 muestra de conductividad eléctrica..... 66
- Figura 4. 9.** Secado a la intemperie de las muestras extraídas del área de estudio en un ambiente del Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque. .... 76
- Figura 4. 10.** Medida de la CE en una solución electrolítica obtenida mediante la relación 1:1 de las muestra de suelo, la diferencia en el color de las muestra F y G, se debe al color de la muestra. .... 77
- Figura 4. 11.** Modelo de absorción y reflexión del espectro visible e infrarrojo cercano respectivamente, en el interior de una hoja saludable, esto se debe a las condiciones óptimas (suelo bajo en sales, bajo estrés hídrico) de producción que presenta una planta, el alto contenido de moléculas de agua presente en los cloroplastos en el interior de las células mesófilas especializadas para la fotosíntesis (*Lee et al.,2012 y Kumar, 2014*), refleja fuertemente las ondas en

el infrarrojo cercano (0.835 $\mu\text{m}$ ), adaptado de: Fuente: <a href="http://arset.gsfc.nasa.gov">http://arset.gsfc.nasa.gov</a> . [Acceso 13-01-2019] .....	80
<b>Figura 4. 12.</b> Cambio estacional del espectro de reflectancia de un cultivo de arroz con diferente Índice de Área Foliar (LAI) y una Gruesa Productividad Primaria (GPP) medido usando un espectro radiómetro. Fuente: Adaptado de <i>Inoue et al., 2008</i> y <i>Sahoo et al., 2015</i> . .....	81
<b>Figura 4. 13.</b> Metodología del presente trabajo de investigación. Fuente: Elaboracion propia. ....	83
<b>Figura 5. 1.</b> Firma espectral del cultivo de arroz con coordenadas UTM (E=618495,0 m – N= 9268225,0 m) obtenidas para el periodo 2001 a 2014.....	85
<b>Figura 5. 2.</b> Firma espectral en cultivos de arroz en diferentes puntos de la Intercuenca Chancay Lambayeque. Las muestras obtenidas pertenecen a la fecha 12 de abril del 2002. ....	87
<b>Figura 5. 3.</b> Serie temporal de valores promedio de NDVI-MODIS-TERRA 250 m de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771, periodo 2001 a 2014. La línea de color negro corresponde a los valores de NDVI original, la línea de color azul corresponde a los valores de NDVI suavizado por el filtro adaptativo de <i>Savitzky-Golay</i> , programa adaptado en el lenguaje de programación IDL.....	89
<b>Figura 5. 4.</b> Serie temporal de valores promedio de NDVI-MODIS-TERRA 250 m de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771, periodo 2001 a 2014. La línea de color negro corresponde a los valores de NDVI original, la línea de color rojo corresponde al NDVI suavizado por el filtro adaptativo de <i>Savitzky-Golay</i> , utilizando el software <i>TimeStats 1.0</i> . ....	90
<b>Figura 5. 5.</b> Distribución espacial de NDVI, de fecha 18/10/2007 del sensor ETM+ a bordo del satélite LandSat-7, cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771. .	91
<b>Figura 5. 6.</b> Variacion temporal del NDVI-MODIS-TERRA 250 m en cultivos de arroz pertenecientes al distrito de Pueblo Nuevo.....	93
<b>Figura 5. 7.</b> Histograma de frecuencia de la imagen de Máximo Valor Compuesto, generada a partir de 25 imágenes de NDVI del sensor ETM+, periodo 2001 – 2014. ...	94

- Figura 5. 8.** Distribución espacial del Máximo Valor Compuesto de NDVI del sensor ETM+-LandSat-7 30 m periodo 2001-2014 de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771. Se utilizó 25 imágenes de NDVI. .... **95**
- Figura 5. 9.** Perímetro GIS generado a un rango de 0,68 – 1 del Máximo Valor Compuesto de NDVI, periodo 2001 - 2014. Áreas de cultivos de arroz. .... **96**
- Figura 5. 10.** Distribución espacial del Máximo Valor Compuesto de NDVI del sensor MODIS-TERRA 250m periodo 2001 - 2014 de la Cuenca Chancay Lambayeque, Intercuenca 137771..... **98**
- Figura 5. 11.** Serie temporal de la distribución espacial del Máximo Valor Compuesto anual de NDVI, periodo 2001 - 2014 en la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771, sensor MODIS a bordo del satélite TERRA..... **100**
- Figura 5. 12.** Mapa de la desviación estándar del NDVI para el periodo 2001 a 2014. Los valores en rojo indican que no existe gran variabilidad de la cobertura del suelo correspondiente a las áreas próximas al Océano Pacífico, ciudades y suelos con alto contenido de sales. Los valores en color verde indican que existió una gran variabilidad en la superficie del suelo, correspondiente a zonas de cultivos de arroz. La superficie marcada (punteada) corresponde a los cerros, con una altura entre 75 a 826 m.s.n.m. aproximadamente. Las áreas en blanco corresponden a otros cultivos y no son tomadas en cuenta en este estudio. Se utilizó 25 imágenes clasificadas del NDVI del sensor ETM+ a bordo del Satélite artificial LandSat-7. .... **102**
- Figura 5. 13.** Perímetro GIS generado a un rango de 0,15 a 0,35 a partir los valores de desviación estándar, Figura 5.12. .... **103**
- Figura 5. 14.** Histograma de frecuencia de la imagen de desviación estándar, generada a partir de 25 imágenes de NDVI del sensor ETM+, periodo 2001 – 2014.... **104**
- Figura 5. 15.** Serie temporal de datos promedio de NDVI cada 16 días, datos obtenidos del sensor MODIS TERRA 250 m. La serie temporal del NDVI se obtuvo a partir de los “*Perímetros GIS*” de cada una de las clases, representadas en la Figura 5.12 mediante la Desviación estándar, obtenida de 25 imágenes de NDVI del sensor ETM+ (resolución espacial de 30 m x 30 m), periodo 2001 - 2014. . **106**

- Figura 5. 16.** Serie de tiempo promedio de NDVI del sensor MODIS, obtenida a partir de los “*Perímetro GIS*” perteneciente a las áreas en color blanco (clase de otros cultivos) de la Figura 5.9, periodo 2001 a 2014. El “*Perímetros GIS*” de estas áreas se obtuvo en un rango de 0,29 - 1,0 NDVI, representada en la Figura 5.5.  
..... **107**
- Figura 5. 17.** Serie de tiempo promedio de NDVI del sensor MODIS, periodo 2001 a 2014. Obtenida a partir de los “*Perímetros GIS*” mostrados en color azul (clase agua, reservorio Boro) de la Figura 5.5..... **108**
- Figura 5. 18.** Serie de tiempo promedio de NDVI del sensor MODIS, periodo 2001 a 2014. Obtenida a partir de los “*Perímetros GIS*” de la superficie punteada presente (clase de cerros, obtenida entre las elevaciones de 75 a 826 m.s.n.m.) en la Figura 5.12..... **109**
- Figura 5. 19.** Serie temporal de precipitación periodo 2001 a 2014, datos obtenidos de la estación meteorológica localizada en el distrito de Reque. .... **109**
- Figura 5. 20.** Las gráficas a), b), c), d) , e), f) muestran la relación que existe entre los valores de conductividad eléctrica del suelo de fecha 18/10/2007 y los valores de reflectancia espectral del suelo de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 del sensor ETM+-Landsat-7 de fecha 20/11/2007. .... **115**
- Figura 5. 21.** Mapa temático de conductividad eléctrica del suelo, de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771. Su obtención, fue aplicando la ecuación 11 de la Tabla 5.3, a cada una de las bandas de reflectancia espectral del suelo, debidamente procesadas, obtenidas del sensor ETM+ del día 20 de noviembre del 2007, fecha de adquisición de la imagen multiespectral utilizada. Se obtuvo 5 clases diferenciadas mediante los colores: marrón, amarillo, azul, rojo y naranja con su respectivo rango de CE del suelo. Las clases celeste y verde se aplicaron a partir de los “*Perímetros GIS*”, obtenidos mediante valores de NDVI entre (-1,0 - 0) y (0,29 - 1,0) respectivamente presentes en la Figura 5.5. La clase cerros se aplicó el “*Perímetro GIS*” obtenido a partir de una imagen DEM (Modelo de Elevación Digital) entre las elevaciones 75 a 826 msnm, Figura B.1 mostrada en el anexo B..... **118**



- Figura 5. 22.** Serie temporal de la variación del valor promedio de NDVI del sensor MODIS para cada una de las clases de la Figura 5.21. La variación estacional del NDVI en el tiempo para las clases marrón y amarillo indican que dichas áreas pertenecen a cultivos de arroz se da esta afirmación por que las otras clases no superan el valor 0,4 de NDVI esto demuestra que en dichas áreas no se instalan cultivos de arroz..... **123**
- Figura 5. 23.** Mapa de CE del suelo del distrito de Pueblo Nuevo “A” para la fecha de adquisición de la imagen del sensor ETM+ 20 de noviembre del 2007. El mapa de Desviación estándar “B”, obtenido a partir de 25 imágenes de NDVI del sensor ETM+ para el periodo 2001-2014. .... **125**
- Figura 5. 24.** Series de tiempo del valor promedio del NDVI “a” obtenida a partir del perímetro GIS con una CE del suelo de [0 – 4] dS/m, representada por los colores marrón y amarillo en la Figura 5.23. En la Figura “b” se muestra la anomalía del NDVI del distrito de Pueblo Nuevo. .... **126**
- Figura 5. 25.** Mapa de CE del suelo del distrito de Mochumi “A” de fecha 20 de noviembre del 2007, sensor ETM+ LandSat-7. Mapa de Desviación estándar “B” obtenido a partir de 25 imágenes de NDVI, sensor ETM+ LandSat-7 del periodo 2001-2014. .... **127**
- Figura 5. 26.** Serie temporal promedio del NDVI “a”, correspondiente a las áreas con valores de CE del suelo comprendido entre [0 – 4] dS/m. Serie temporal de la anomalía del NDVI “b” registrada en el distrito de Mochumi en el periodo 2001-2014, se observó tres anomalías significativas en los años 2004, 2009 y 2011 que corresponden a eventos de sequía ocurridos en la costa norte..... **128**
- Figura 5. 27.** Mapa de CE del suelo del distrito de Ferreñafe “A” de fecha 20 de noviembre del 2007, imagen del sensor ETM+ LandSat-7. Mapa de desviación estándar “B” obtenido a partir de 25 imágenes del NDVI, imagen del sensor ETM+ LandSat-7 para el periodo 2001-2014. .... **129**
- Figura 5. 28.** Serie temporal promedio del NDVI “a”, correspondiente a las áreas con valores de CE del suelo comprendido entre [0 – 4] dS/m. Serie temporal de la anomalía del NDVI “b” determinada en el distrito de Ferreñafe durante el periodo 2001-2014..... **130**

- Figura 5. 29.** Mapa de CE del suelo del distrito de Lambayeque “A” de fecha 20 de noviembre del 2007, imagen del sensor ETM+ LandSat-7. Mapa de desviación estándar “B” obtenido a partir de 25 imágenes del NDVI, sensor ETM+ LandSat-7 del periodo 2001-2014. .... **132**
- Figura 5. 30.** Serie temporal promedio del NDVI “a”, correspondiente a las áreas con valores de CE del suelo comprendido entre  $[0 - 4]$  dS/m. Serie temporal de la anomalía del NDVI “b” determinada en el distrito de Lambayeque durante el periodo 2001-2014..... **132**
- Figura 5. 31.** Mapa de CE del suelo del distrito de Pícsi “A” de fecha 20 de noviembre del 2007, imagen del sensor ETM+ LandSat-7. Mapa de desviación estándar “B” obtenido a partir de 25 imágenes del NDVI, sensor ETM+ LandSat-7 del periodo 2001-2014..... **134**
- Figura 5. 32.** Serie temporal promedio del NDVI “a”, correspondiente a las áreas con valores de CE del suelo comprendido entre  $[0 - 4]$  dS/m. En “b” se muestra la serie temporal de la anomalía del NDVI determinada en el distrito de Pícsi durante el periodo 2001-2014..... **135**
- Figura 5. 33.** Mapa de CE del suelo del distrito de Pimentel “A” de fecha 20 de noviembre del 2007, imagen del sensor ETM+ LandSat-7. Mapa de desviación estándar “B” obtenido a partir de 25 imágenes del NDVI, sensor ETM+ LandSat-7 del periodo 2001-2014..... **137**
- Figura 5. 34.** Serie temporal promedio del NDVI “a”, correspondiente a las áreas con valores de CE del suelo comprendido entre  $[0 - 4]$  dS/m. Serie temporal de la anomalía del NDVI “b” determinada en el distrito de Pimentel durante el periodo 2001-2014..... **137**
- Figura 5. 35.** Mapa de CE del suelo del distrito de José Leonardo Ortiz “A” de fecha 20 de noviembre del 2007, imagen del sensor ETM+ LandSat-7. Mapa de desviación estándar “B” obtenido a partir de 25 imágenes del NDVI, sensor ETM+ LandSat-7 del periodo 2001-2014. .... **138**
- Figura 5. 36.** Serie temporal promedio del NDVI “a”, correspondiente a las áreas con valores de CE del suelo comprendido entre  $[0 - 4]$  dS/m. Serie temporal de la

anomalía del NDVI “b” determinada en el distrito de Pimentel durante el periodo 2001-2014.....	139
<b>Figura 5. 37.</b> Espectros de frecuencias obtenidos de las series temporales de los siete distritos mostrados en las Figuras 5.24a, 5.26a, 5.28a, 5.30a, 5.32a, 5.34a y 5.36a. El periodo es exactamente el mismo para cada una de estas series. ...	143
<b>Figura 5. 38.</b> Gráfico de dispersión entre las superficies de cultivos de arroz, estimada por satélite (sensor ETM+ LandSat-7) usando datos de CE del suelo y datos in-situ de superficie cosechada, teniendo en cuenta los valores en la Tabla 4.7 y la Figura 5.17. El rango de CE del suelo para el área estimada es: 0 a 4 dS/m. ....	145
<b>Figura 5. 39.</b> Gráfico de dispersión entre las superficies de cultivos de arroz, estimada por satélite (sensor ETM+ LandSat-7) mediante la desviación estándar y datos in-situ de superficie cosechada, teniendo en cuenta los valores de la clase color verde en la Figura 5.15. ....	145
<b>Figura 5. 40.</b> Gráfico de dispersión entre las superficies de cultivos de arroz, estimada por satélite mediante la desviación estándar y CE del suelo (sensor ETM+ LandSat-7).....	146
<b>Figura 5. 41.</b> Modelo operacional de detección de cultivos de arroz en la Cuenca Chancay Lambayeque, Intercuenca 137771.....	149
<b>Figura 5. 42.</b> Series temporales del NDVI de cultivos de arroz de las regiones Lambayeque, La Libertad y Arequipa. Se muestra que los eventos de sequía ocurridos en los años 2004 y 2011 en la costa norte del Perú, corresponden a eventos de sequía regionales.....	150
<b>Figura A. 1.</b> Ejemplos para obtener el máximo y mínimo valor compuesto en imágenes.....	158
<b>Figura A. 2.</b> Imagen GDEM ASTER, perteneciente a las escenas S07W080 y S07W081 (GDEM: Global Digital Elevation Model). ....	160
<b>Figura A. 3.</b> Modelo de elevación digital de los terrenos de la Cuenca Chancay Lambayeque, Intercuenca 137771, a partir de GDEM ASTER. ....	161

### Lista de tablas

<b>Tabla 4. 1.</b> Características generales y porcentajes de nubosidad de imágenes del sensor ETM+ y TM a bordo del satélite LandSat-7 y 5, path: 10, row: 65. ....	<b>40</b>
<b>Tabla 4. 2.</b> Características generales de los sensores a bordo de los satélites de la serie LandSat [4]. ....	<b>43</b>
<b>Tabla 4. 3.</b> Descripción de los coeficientes (variable) que intervienen en la obtención de la Radiancia espectral. Los coeficientes de la ecuación 4.5 se encuentran en la hoja de características de cada imagen satelital, estos coeficientes son proporcionados por el satélite [4]. ....	<b>46</b>
<b>Tabla 4. 4.</b> Rango espectral del sensor ETM+, $L_{\min \lambda}$ y $L_{\max \lambda}$ , en modo de alta ganancia (LPGS), Irradiancia solar exatmosférica $ESUN_{\lambda}$ [4]. ....	<b>47</b>
<b>Tabla 4. 5.</b> Rango espectral del sensor ETM+, $L_{\min \lambda}$ y $L_{\max \lambda}$ , en modo de baja ganancia (LPGS), Irradiancia solar exoatmosférica $ESUN_{\lambda}$ [4]. ....	<b>48</b>
<b>Tabla 4. 6.</b> Rangos generales de las plantas tolerantes a la salinidad [20].....	<b>63</b>
<b>Tabla 4. 7.</b> Tolerancia de la salinidad en algunos cultivos[11]. ....	<b>64</b>
<b>Tabla 4. 8.</b> Número de muestras de campo tomadas en los años 2007, 2008, 2009, 2010 y 2015 pertenecientes a cultivos de arroz en el área de estudio. ....	<b>67</b>
<b>Tabla 4. 9.</b> Obtención de la cantidad de carga eléctrica aproximada, de cada una de las muestras de suelo. ....	<b>77</b>
<b>Tabla 5. 1.</b> Cifras de cultivos de arroz frente a problemas de sequias en la cuenca Chancay Lambayeque. Data del PEOT y junta de usuarios Chancay-Lambayeque [32]. ....	<b>98</b>
<b>Tabla 5. 2.</b> Modelos estadísticos de regresión lineal simple, mediante el método de mínimos cuadrados, entre los valores de CE del suelo y reflectancia espectral del suelo, de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 del sensor ETM+ LandSat-7. ....	<b>112</b>

<b>Tabla 5. 3.</b> Modelos de regresión lineal múltiple para estimar la conductividad eléctrica del suelo (dS/m), a partir de la imagen de reflectancia espectral del suelo (B1, B2, B3, B4, B5 y B7 del sensor ETM+ - Landsat-7) y datos de campo de CE. .	<b>116</b>
<b>Tabla 5. 4.</b> Superficie de cultivos de arroz estimada por satélite, mediante la CE del suelo, desviación estándar. Datos In-Situ de superficie cosechada de cultivos de arroz. ....	<b>144</b>
<b>Tabla C. 1.</b> Datos de superficie cosechada (ha) de cultivos de arroz en siete distritos dentro del área de estudio. ....	<b>162</b>
<b>Tabla C. 2.</b> Datos de producción (tn) de cultivos de arroz en siete distritos dentro del área de estudio. ....	<b>162</b>
<b>Tabla C. 3.</b> Datos de rendimiento (kg/ha) de cultivos de arroz en siete distritos dentro del área de estudio. ....	<b>163</b>
<b>Tabla D. 1.</b> Extracción de los valores de reflectancia para las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7.de la imagen ETM+ 20/11/2007.....	<b>164</b>

## **Acrónimos**

<b>CE</b>	Conductividad Eléctrica del suelo
<b>ENVI</b>	Environment for Visualizing Images.
<b>ETM+</b>	Enhanced Thematic Mapper Plus.
<b>HDF</b>	High Density Fiberboard
<b>IDL</b>	Interactive Data Language.
<b>IFOV</b>	Instantaneous Field of View
<b>LPGS</b>	Level 1 Product Generation System
<b>MODIS</b>	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.
<b>MODTRAN</b>	Moderate Resolution Atmospheric Transmission
<b>MSS</b>	Multispectral Scanner.
<b>NDVI</b>	Normalized Difference Vegetation Index.
<b>NIR</b>	Near-infrared
<b>NLAPS</b>	National LandSat Archive Production System
<b>TM</b>	Thematic Mapper.
<b>USGS</b>	United States Geological Survey
<b>REM</b>	Región Electromagnética

## I. Resumen

El objetivo del presente trabajo, es detectar áreas de cultivos de arroz en la cuenca Chancay-Lambayeque, intercuenca 137771, en el espacio y tiempo, utilizando datos de conductividad eléctrica (CE) del suelo del área de estudio e imágenes satelitales de alta resolución espacial y temporal. Los datos utilizados son: imágenes del sensor ETM+ abordo del satélite LandSat-7 de 30 m x 30 m de resolución espacial y 16 días de resolución temporal, imágenes producto de NDVI del sensor MODIS abordo del satélite TERRA de 250 m x 250 m de resolución espacial y 16 días de resolución temporal, datos de conductividad eléctrica (CE) del suelo de áreas de cultivo de arroz. Las imágenes LandSat-7 se procesaron usando el software ENVI 5.1 y el lenguaje de programación IDL, las imágenes producto del NDVI del sensor MODIS, fueron procesadas y suavizadas usando los módulos Conversion Toolkit y TimeStats.

Para tal fin, se estimó la reflectancia de la superficie del suelo y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de imágenes LandSat-7. La detección de las áreas, donde se siembran los cultivos de arroz en la zona de estudio, se determinó mediante el Máximo Valor Compuesto (MVC) de 71 imágenes del NDVI y la desviación estándar de 25 imágenes del NDVI del sensor ETM+ LandSat-7 en el periodo 2001 - 2014. Logrando separar las áreas de cultivo de arroz de áreas arboladas, caminos, canales, ciudades y suelos en descanso. A partir de la desviación estándar del NDVI, se obtuvo un perímetro GIS (aproximadamente de 42 218,82 ha de alta variabilidad) de tierras cultivables, el cual se eligió para realizar un análisis de la variación temporal del NDVI (periodo 2001 – 2014) usando datos del sensor MODIS, con lo cual se determina y comprueba la instalación de cultivos de arroz en el área de estudio, mediante la estacionalidad fenológica de la serie temporal del NDVI.

Usando la reflectancia espectral de la superficie del suelo de imágenes del sensor ETM+, se obtuvo modelos de regresión lineal múltiple entre los datos de CE (dS/m) del suelo de fecha 18 de octubre del 2007 y las bandas de reflectancia espectral B1, B2, B3 y B4 del sensor ETM+ del día 20 de noviembre del 2007, obteniéndose un coeficiente de correlación R de 0,81. A través de la ecuación de regresión lineal múltiple, se aplicó a cada una de las bandas de reflectancia (B1, B2, B3 y B4) generando un mapa temático de distribución espacial de la CE del suelo. Se presentó 5 clases de suelos con su respectivo rango de CE. Como resultado se obtuvo, 21 602,25 ha de suelos con una CE entre 0 - 2 dS/m (un aproximado del 14,88 % del área total), representado en color marrón, que pertenecen a suelos de muy buena calidad agrícola para la siembra de cultivo de arroz. 22 426,51 ha de suelos con una CE entre 2 - 4 dS/m (un aproximado del 15,44 % del área total), representado en color amarillo, y pertenecen a suelos de regular calidad agrícola para el cultivo de arroz. 13 436,73 ha de suelos con una CE entre 4 - 8 dS/m (un aproximado del 9,25 % del área total), estos suelos están representados por la clase de color azul, dichos suelos presentan una CE muy alta para la siembra de cultivos de arroz, lo que originaría pérdidas en la producción según la Tabla 4.7. 22 848,12 ha de suelos, con una CE muy alta entre 8 - 16 dS/m, son suelos no aptos para el cultivo de arroz según la tabla 4.7, estas áreas están representadas en color rojo (un aproximado del 15,74 % del área total). 26 207,01 ha de suelos con una CE extremadamente alta (mayor a 16 dS/m), suelos no aptos para cultivo de arroz, representados en color naranja (un aproximado del 18,05 % del área total). Se obtuvo la variación temporal (periodo 2001-2014) del NDVI de cada una de las clases de distribución espacial de la CE del suelo, teniendo como límite inferior el valor de 0,4 NDVI, los valores inferiores a 0,4 NDVI indican que no existió cultivo de arroz.



La serie temporal del NDVI muestra dos anomalías significativas en los años 2004 y 2011; la primera corresponde al evento de sequía regional ocurrida en el año 2004, la segunda anomalía ocurrida en el año 2011 corresponde a un evento de sequía de menor intensidad a la ocurrida en el año 2004.

## II. Introducción

### 2.1 Problema:

En el Perú, las áreas de producción agrícola con suelos salinizados, se localizan principalmente en la costa norte, especialmente en la región Lambayeque, siendo el cultivo de arroz la principal fuente económica de la población, el cual mantiene características especiales de conductividad eléctrica (CE) del suelo durante su desarrollo vegetativo, si este parámetro físico de conductividad eléctrica del suelo se incrementa por encima del umbral base establecido en la Tabla 4.7, existe serios problemas de producción, lo que conlleva a que las áreas de cultivo de arroz disminuyan y al mismo tiempo, existe una mala distribución del recurso hídrico. Los métodos convencionales de identificación de áreas cultivables requieren mucho tiempo, con lo cual se pone en peligro la seguridad alimentaria en el Perú y el resto del Planeta.

Teniendo en cuenta que existe una necesidad por parte del Estado Peruano de mantener la seguridad alimentaria en el país, es necesario tener una vigilancia continua de las áreas agrícolas utilizando imágenes satelitales de alta resolución espacial y temporal. En base a esta realidad y con la finalidad de prever y planificar una agricultura eficiente, planteamos el siguiente problema de investigación:

**¿Cómo detectar áreas de cultivo de arroz usando imágenes satelitales y datos de conductividad eléctrica del suelo (CE) en la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771?**

### 2.2. Objetivos

Se presentan a continuación los objetivos a seguir para cumplir con lo establecido en el título de la tesis.

### **2.2.1. Objetivo general:**

Detectar las áreas productivas de arroz en la intercuenca 137771-Lambayeque, en función del espacio y tiempo utilizando datos del NDVI de imágenes satelitales y datos de conductividad eléctrica del suelo.

### **2.2.2. Objetivos específicos:**

- Desarrollar una metodología pertinente, para generar mapas de distribución espacial de la conductividad eléctrica del suelo, en terrenos cultivados de arroz utilizando imágenes de satélite.
- Elaborar mapas de índice de vegetación de diferencia normalizada.
- Identificar las áreas de cultivos de arroz en la intercuenca 137771-Lambayeque, utilizando imágenes de satélite y series temporal de índice de vegetación de diferencia normalizada.
- Implementar un sistema operacional de la variación temporal y espacial de áreas de cultivo de arroz utilizando imágenes de satélite.

## **2.3. Importancia**

La agricultura en el Perú es una de las actividades económicas más desarrolladas por las familias del medio rural, y una de las fuentes de alimentación más importante en el mundo; siendo la producción de arroz, un cereal de alta demanda en el mundo y principalmente en el Perú. El Ministerio de Agricultura invierte en la vigilancia de todos los cultivos permanentemente para asegurar el equilibrio en la demanda de productos agrícolas en el mercado peruano, para mantener la seguridad alimentaria en el Perú. El presente trabajo de investigación ayudará en la vigilancia de las áreas de cultivo de arroz a escala regional en un menor tiempo y a bajo costo, por lo cual,

es un trabajo de suma importancia para las entidades del Estado Peruano relacionadas al tema agrícola.

## **2.4. Antecedentes**

Revisando diferentes bibliografías, encontramos los siguientes trabajos de investigación relacionados con el tema de estudio:

### **A.- “Relación de la conductividad eléctrica de los suelos con la reflectancia de imágenes de satélite en la región Lambayeque- Perú”.**

Autores: Joel Rojas Acuña y Eleazar Manuel Rufasto Campos. (2011) [22].

Los investigadores mencionan las siguientes conclusiones:

- a) Proponen una metodología que permite estimar la salinidad del suelo haciendo uso de la reflectancia espectral de las bandas 1 a 7 del sensor ETM+ transportado por el satélite LandSat-7 y datos de conductividad eléctrica (CE) del extracto del suelo de la zona de estudio.
- b) El análisis estadístico de regresión lineal simple entre la reflectancia de las bandas 1-7 del sensor ETM+ y los datos de conductividad eléctrica (CE) medidas in-situ, presentan un alto coeficiente de determinación, siendo la banda 3 la de mayor coeficiente de determinación ( $R^2$ ) con la CEe (0,65-0,85).

### **B.- “Detección de la salinidad en los suelos de cultivos de algodón usando imágenes de satélite en la costa norte del Perú”.**

Autor: Rolando Renee Badaracco Meza (2012) [1]. El investigador dentro de sus conclusiones menciona:

- a) El uso de modelos estadísticos de regresión lineal múltiple elaborados con valores de conductividad eléctrica del extracto de suelo como indicador de la salinidad del suelo-subsuelo: Zona de raíz del cultivo de algodón en Lambayeque, índice de vegetación de diferencia

normalizada, índice de salinidad, componente principal 2, y valores de reflectancia de imágenes satelitales (imágenes del sensor ETM+ del satélite LandSat-7 y ASTER), para estimar la salinidad del suelo en cultivos de algodón, dichos modelos presentaron coeficientes de correlación negativas ligeramente mayor que los modelos estadísticos de regresión lineal simple.

**b)** Los resultados obtenidos mediante modelos de regresión lineal múltiple, fueron mapas temáticos de conductividad eléctrica del área de estudio y como resultado final, mediante una regresión lineal simple, se correlacionó los datos de CE estimada y CE in-situ presentando una alta correlación entre 0,72 y 0,95. Según el autor, es más confiable generar imágenes clasificados de salinidad de los suelos con los modelos de regresión lineal múltiple.

### **C.- “Detección de suelos salinos con series de tiempo de datos MODIS VI”.**

Autores Ting-Ting Zhang, Jia-Guo Qi, Yu Gao, Zu-Tao Ouyang (2015)[27]

Los investigadores en sus conclusiones mencionan:

**a)** Explican que la relación existente entre la salinidad de los suelos y los índices de vegetación NDVI y EVI son altos, los datos de series de tiempo de NDVI y EVI, se obtienen de imágenes satelitales de alta resolución temporal (imágenes MODIS). Los resultados mostraron que la calidad de los datos de series de tiempo de los índices de vegetación (NDVI y EVI), mejorados con el filtro de Savitzky-Golay, proporcionan umbrales precisos de etapas fenológicas (trasplante, formación y floración de los cultivos).

**b)** Los perfiles de series de tiempo EVI suavizado (serie integral) y los datos de conductividad eléctrica del suelo, se correlacionaron mejor (0,65-0,95) que la serie integral de NDVI, lo cual se utilizó como el indicador del grado de salinidad del suelo. Finalmente los autores generaron mapas de vigilancia de la distribución espacial de la salinidad en los suelos de cultivo.

**D.- “Mapping paddy rice planting área in cold temperate climate región through analysis of time series Landsat 8 (OLI), Landsat 7 (ETM+) and MODIS imagery”.** Autores: Yuanwei Qin, et al. (2015)

Los autores en sus conclusiones mencionan:

- a) Los algoritmos propuestos basados en píxeles y fenología son usados para el mapeo de cultivo de arroz usando imágenes satelitales, utilizando la única característica espectral en los campos cultivables, que es durante el periodo de inundación (siembra), ahijamiento (macollo) y floración (fruto) del cultivo, estos son capturados con la dinámica de los índices de vegetación, los cuales son usados para identificar los campos de cultivo de arroz.
- b) Los mapas obtenidos de áreas cultivables de arroz, tienen una alta correlación con los datos estadísticos oficiales del Estado ( $R^2=0,94$ ), estos resultados demuestran que la combinación de imágenes de alta resolución espacial (Imágenes LandSat) y el algoritmo basado en la fenología (Imágenes MODIS) proporciona un enfoque simple, robusto y automatizado para mapear la distribución de campos de arroz en un año agrícola.

**E.- “Identificación de tierras degradadas por salinidad del suelo en los cultivos de caña de azúcar en Pomalca usando imágenes de satélite”.**

Autor: Renato Soca Flores (2015) [25]

El autor en sus conclusiones menciona:

- a) El NDVI es un parámetro físico muy utilizado y confiable para el estudio de cultivos de caña de azúcar, utilizado para monitorear la dinámica de producción de la caña de azúcar en el periodo 2007-2010 en los campos de la empresa agroindustrial Pomalca.
- b) La utilización del Máximo Valor Compuesto (MVC) de las imágenes de NDVI (2007-2010), ayuda a identificar con certeza en un rango de NDVI (0,57 - 1), las áreas de buena producción de

caña de azúcar y suelos con baja calidad agrícola, también identifica los cerros y ciudades con valores inferiores a 0,57 de NDVI.

c) La variación del NDVI en el tiempo, permitió la visualización y el análisis de la dinámica del cultivo de caña de azúcar en tierras con problemas de salinidad y tierras en buen estado sin problemas de salinidad.

d) Los modelos estadísticos de regresión lineal, elaborados para estimar la salinidad del suelo usando la reflectancia de las bandas del sensor LandSat frente a los valores de conductividad eléctrica del suelo, presentaron coeficientes de correlación de alta significancia para las bandas B1 (azul), B2 (verde), B3 (rojo) y B4 (infrarrojo cercano), siendo las bandas del visible (B1 y B2), las de mayor correlación con la conductividad eléctrica del suelo.

## **2.5. Justificación**

Esta investigación es importante, porque permitirá determinar las áreas propicias para el cultivo de arroz, así también, aquellas áreas de deficiente producción que originan bajo rendimiento en la inversión agrícola, a fin de poder reemplazar el cultivo de arroz por otro cultivo alternativo que ayude a la recuperación del suelo, genere mejores ingresos, disminuya el desempleo y contribuya a una distribución eficiente del recurso hídrico, teniendo en cuenta que el cultivo de arroz es la actividad que más agua utiliza comparado con otros cultivos tradicionales.

Los resultados que se obtengan de este estudio ayudarán al Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) a promover el desarrollo de las familias campesinas a través de programas que tengan como objetivo central, elevar la competitividad del agro, tecnificar los cultivos, fomentar un mayor acceso a los mercados, con la finalidad de elevar la calidad de vida de las familias del campo.

## **2.6. Hipótesis**

"Es posible detectar las áreas cultivables de arroz utilizando imágenes satelitales y la conductividad eléctrica del suelo en la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771"

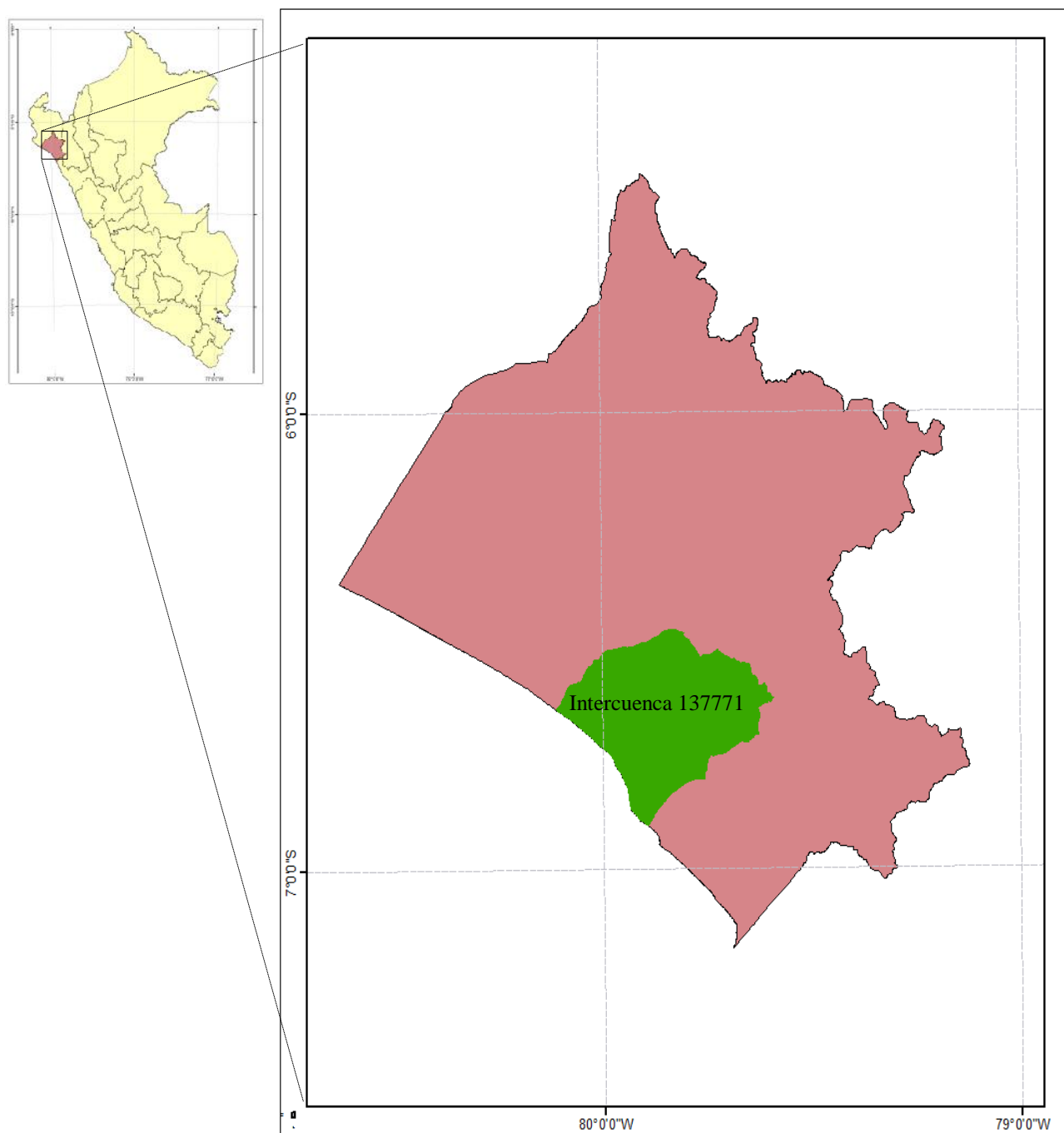
## **2.7. Área de estudio**

La cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771, se encuentra en la región Lambayeque, Figura 2.1, su principal actividad agrícola es el cultivo de arroz, siendo su principal fuente de agua el río Chancay.

### **2.7.1. Plano Geodésico de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771.**

En la figura 2.2 se muestra el plano geodésico de la intercuenca 137771, que representa la parte más baja de la cuenca Chancay Lambayeque (color verde).





**Figura 2. 1.** En color verde se muestra el área de estudio, la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771.

Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia.

### **2.7.2. Área de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771**

La superficie de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771, alcanza un total de 145 209,24 ha. El área agrícola de cultivo de arroz, clasificada mediante la desviación estándar, en el periodo 2001 – 2014, es de 42 218,82 ha. Las áreas de cultivos de arroz, clasificada mediante la conductividad eléctrica para el año 2007 es de 44 028,76 ha.

### **2.7.3. Clima**

El clima en la cuenca es cálido-templado durante las estaciones de primavera, otoño e invierno, y caluroso en la estación de verano. Esto es regulado por la Cadena Occidental de los Andes, la corriente marina de “Humboldt” y la ocurrencia de la corriente marina “El Niño”. La temperatura del aire en la cuenca es variable, en la estación del distrito de Lambayeque (UNPRG), el promedio anual es de 21 °C y en la estación Tinajones, 23 °C. Los valores mínimos registran un promedio anual de 17,9 °C en el distrito de Lambayeque (estación meteorológica de la UNPRG); 18,3 °C en la estación de Tinajones, los máximos anuales alcanzan los 25,8 °C en el distrito de Lambayeque y 29,9 °C en la estación Tinajones. La humedad relativa varía entre el 51 % y 93 % (estación metrológica de la UNPRG). Las precipitaciones anuales promedio, varían desde los 0.5 hasta 33.05 mm, presentando un periodo lluvioso en los meses de diciembre a abril; de mayo a septiembre, estas son nulas y de octubre a diciembre son esporádicas, los valores de las precipitaciones se ven notablemente alteradas durante la ocurrencia del fenómeno “El Niño” [17].

### **2.7.4. Relieve**

El entorno físico presenta un suelo llano, de suave pendiente en dirección descendiente de NE a SO, menor de 5° sexagesimales. Además, presenta pequeñas elevaciones constituidas por dunas, y depresiones fácilmente inundables de tipo fluvial y pluvial, especialmente cuando

se presenta el fenómeno “El Niño”; es atravesado de NE a SO por el dren mil que recolecta el agua producto de las filtraciones de las partes altas que son encausadas hacia el Océano Pacífico [17].

### **2.7.5. Hidrografía**

El sistema hidrográfico lo conforman el canal Taymi , Figura 2.2, que depende del reservorio de Tinajones, el cual, al mismo tiempo depende del caudal del río Chancay-Lambayeque, además el dren mil que es el más importante, que inicia su recorrido en las parcelas de los cultivos de arroz del distrito de Ferreñafe. A lo largo del año presentan una descarga irregular de agua, aumentan su caudal entre los meses de diciembre a abril, mientras que en el resto del año disminuyen totalmente, dependiendo de la cantidad de agua almacenada en el reservorio de Tinajones [17].

### **2.7.6. Actividades**

Las actividades económicas más importantes en la cuenca son: pesca, agricultura (arroz como principal cultivo, maíz, alfalfa, algodón, etc.), industria manufacturera y comercio (restaurantes y turismo). Se debe destacar que en el distrito de Lambayeque se encuentra uno de los centros de estudio e investigación más importantes del norte del Perú, la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo (UNPRG) que reúne estudiantes de diferentes puntos de la sierra y selva norte del país [28].

#### **2.7.6.1. Cultivos de arroz en la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771.**

La región Lambayeque es el escenario más importante para estudiar los componentes relacionados al cultivo de arroz, debido a que es el primer productor del país, con un aporte de más del 20 % del cereal pilado a la oferta nacional. El arroz en la región Lambayeque representa el 50 % del total de los cultivos transitorios instalados por campaña, por lo cual

la economía de la población gira en torno a este cultivo. La instalación de los cultivos de arroz en los valles de Lambayeque dependen de la disponibilidad de agua y de su almacenamiento en el reservorio de Tinajones. El distrito de Lambayeque es el mayor productor de arroz de esta región, según la oficina de Información Agraria del Perú [18].

#### **2.7.6.2. Inicio y fin de los cultivos de arroz en la Intercuenca 137771**

A partir del año 1999 se viene instalando una política de trabajo en coordinación con las comisiones de regantes de cada distrito de riego, comisión de regantes Chancay Lambayeque, gobierno regional y ministerio de agricultura, para que exista homogeneidad en el inicio de instalación del cultivo de arroz, a fin de mejorar la sanidad de este producto, que está íntimamente relacionado a la rentabilidad del costo de producción. En el año 2000 se constató un significativo desorden en la instalación de cultivos de arroz, observándose la existencia simultánea de zonas en plena etapa de trasplante, macollamiento, iniciación y desarrollo de la panícula y en algunos lugares incluso la floración [18]. Esta falta de homogeneidad en la instalación del cultivo provoca serios problemas sanitarios, ya que se dificulta el corte del ciclo biológico de las plagas y enfermedades, dando lugar a enfermedades no comunes en la zona. La desimanación de estas enfermedades se puede controlar teniendo una buena homogeneidad en la instalación del cultivo, ya que influye el tipo de cultivo, calidad de suelo y agua.

En la actualidad la mayoría de los sectores (comisiones de regantes) dependen del agua almacenada en el reservorio de Tinajones para culminar su producción, por lo cual se tiene instalada una política de control para la instalación de cultivos de arroz, que se inicia en el mes de diciembre, hasta el mes de mayo del siguiente año aproximadamente. Este inicio está sujeto a las condiciones climáticas de la zona, por lo cual, el inicio de instalación

de los cultivos puede adelantarse a la fecha indicada o retrasarse debido a la disponibilidad de agua.

### **III. Marco teórico.**

#### **3.1. Fundamento físico de teledetección**

La Teledetección es una técnica fundamental para la recepción de datos, imágenes de objetos o fenómenos ubicados en la superficie terrestre o atmósfera, haciendo uso de la radiación electromagnética.

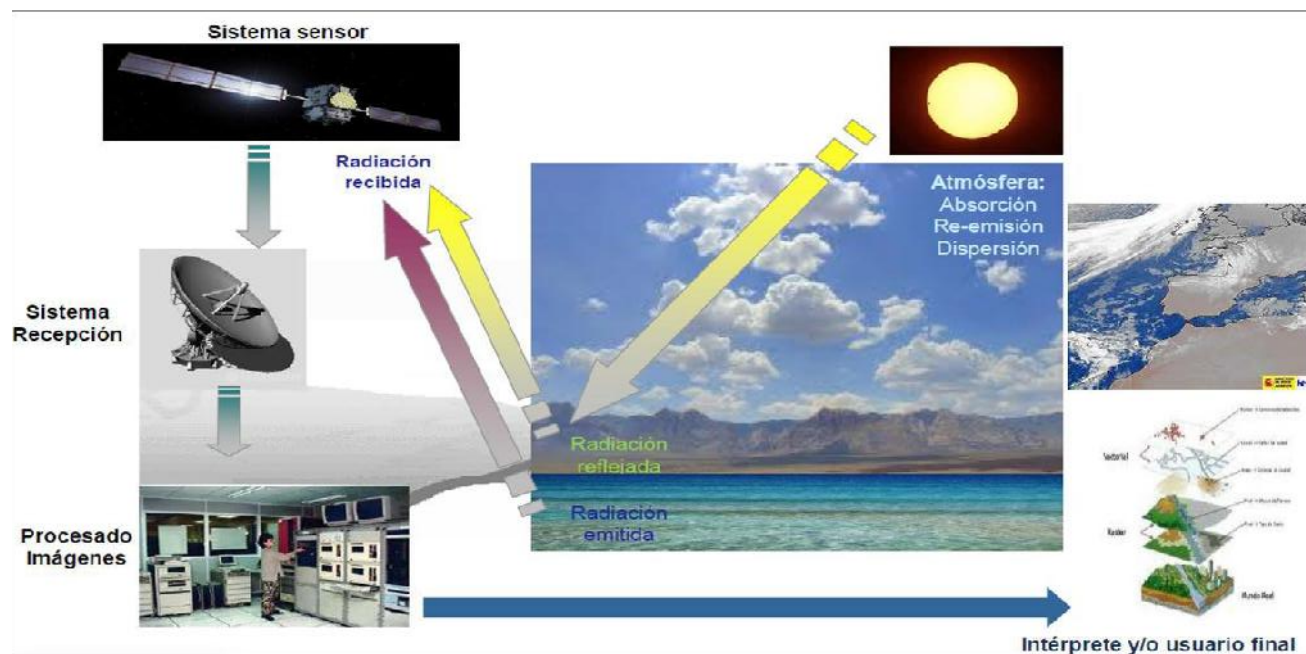
El principio físico de la teledetección, parte de una perturbación, generada en el campo electromagnético de una superficie observada (fuente - objeto). Esta energía adquirida por el campo electromagnético (energía electromagnética) es transmitida al sistema de sensores en la plataforma satelital, los sensores captan dicha señal que será registrada, almacenada y después interpretada, de acuerdo a las características físicas que presenta dicha onda electromagnética al instante de ser registrada. Generalmente, la teledetección tiene por objeto la observación exterior de la superficie terrestre y los múltiples fenómenos naturales que en ella tienen lugar, a partir del registro de señales electromagnéticas por parte del sensor. El principal problema que se encuentra en el campo de la teledetección, es la transformación de dichos datos registrados en magnitudes físicas y convertirlas en información útil para el usuario.

Este problema se vuelve complicado cuando se trabaja con un sistema remoto pasivo, como son los sensores: MSS, TM, ETM+, EO-1 ALI, MODIS, Spot, etc, en los cuales es necesario realizar una corrección atmosférica, ruido, nubosidad y datos perdidos a través de un software, para obtener datos acorde con la realidad actual de la superficie [1].

En teledetección se tiene una serie de procedimientos que se deben seguir para la obtención de las imágenes digitales, así tenemos:

1. Fuente solar
2. Superficie

3. Atmósfera
4. Sensor
5. Sistema de recepción
6. Procesador de imágenes
7. Usuario



**Figura 3. 1.** Procedimiento para la obtención de las imágenes satelitales y su utilización. La fuente principal de energía que utilizan los sensores pasivos como MODIS, ETM, SPOT, etc., es el Sol. El paso de esta radiación se da en dos etapas: Fuente (Sol) – objeto (superficie del suelo) y Objeto – Sensor (plataforma satelital donde se encuentran ubicados los sensores que captan dicha radiación proveniente de la superficie del suelo).

Fuente: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-9/landsat-9-spectral-bands/> [Acceso 13-12-2018].



### 3.1.1. Radiación electromagnética (REM)

Las propiedades de la radiación electromagnética se basan en dos teorías: aquella que la concibe como un haz ondulatorio (Huygens y Maxwell), y la otra que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones y cuantos, con masa igual a cero (Planck y Einstein), se ha logrado demostrar que la luz presenta un comportamiento dual.

La energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerza perpendiculares entre sí: campos eléctrico y magnético. Las características del flujo energético pueden describirse por dos elementos: longitud de onda ( $\lambda$ ) y frecuencia ( $\nu$ ), ambos están inversamente relacionados:

$$c = \lambda \nu \quad (3.1)$$

$c$  : Velocidad de la luz ( $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ )

$\lambda$  : Longitud de onda (micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) o nanómetros ( $\text{nm}$ ))

$\nu$  : Frecuencia (Hertz ( $\text{Hz}$ ))

Al estudiar la electricidad y el magnetismo encontramos un número de relaciones que se describen por productos vectoriales. La intensidad de campo eléctrico ( $\vec{E}$ ), variable en el tiempo, genera un campo de inducción magnética ( $\vec{B}$ ) que es en todas partes perpendicular a la dirección en la que  $\vec{E}$  cambia. En la misma forma, un campo  $\vec{B}$  variable con el tiempo genera un campo  $\vec{E}$  que es perpendicular en todas partes a la dirección en la que  $\vec{B}$  cambia. Por lo tanto, se puede anticipar la naturaleza transversal general de los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  en una perturbación electromagnética. Tres observaciones, a partir de las cuales se puede construir, un

modelo cualitativo, que son: La perpendicularidad de los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ , la simetría de las ecuaciones de Maxwell, y la dependencia de  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ .

Las ecuaciones que gobiernan los fenómenos electromagnéticos son las ecuaciones de Maxwell, para una fuente externa en el espacio libre, son:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_o} \quad (3.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = \text{div } \vec{B} = 0 \quad (3.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \text{rot } \vec{B} = \mu_o \epsilon_o \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_o \sigma \vec{E} \quad (3.5)$$

Dónde:

$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm A}^{-1}$ , es la permeabilidad del espacio libre.

$\vec{E}$ : Intensidad de campo eléctrico ( $\text{N.C}^{-1}$ ).

$\vec{B}$ : Inducción magnética (T).

$\rho$ : Densidad de carga eléctrica volumétrica ( $\text{C.m}^{-3}$ )

$\epsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , es la permisividad del espacio libre.

$\sigma$ : Conductividad eléctrica ( $\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ ).

t: Tiempo (s)

Las ecuaciones de Maxwell se pueden escribir en forma diferencial lo que será útil para los propósitos establecidos en los sensores, de cuantificar las longitudes de onda para cada una de las bandas en la que estos son diseñados, además de predecir la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan a través del espacio a la velocidad de la luz. Para entender mejor la predicción de las ondas electromagnéticas, consideremos un campo eléctrico oscilante

en dirección del eje “y” y un campo magnético en la dirección del eje “z”. Con ayuda de la ley de inducción de Faraday y la aplicabilidad del Teorema de Stokes, las ecuaciones (3.3) y (3.4) se pueden expresar:

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial x} = -\mu_o \epsilon_o \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (3.7)$$

Derivando nuevamente ambas ecuaciones respecto la dirección “x”, combinándolas ente si, se tiene la forma general de la ecuación de onda.

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu_o \epsilon_o \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \mu_o \epsilon_o \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2} \quad (3.9)$$

### 3.1.2. Espectro electromagnético (EEM)

El espectro electromagnético se extiende desde los rayos cósmicos con longitudes de ondas en microondas hasta las longitudes de ondas kilométricas producidas por grandes oscilaciones eléctricas (Figura 3.2). Las longitudes de ondas más utilizadas son de la región del visible e infrarrojo cercano, están alrededor de 0,4  $\mu m$  y 1,3  $\mu m$  [26].

Las bandas espectrales más usadas en teledetección son las siguientes:

**A) Espectro visible** (0,4 - 0,7 $\mu m$ ): Es la radiación que perciben nuestros ojos.

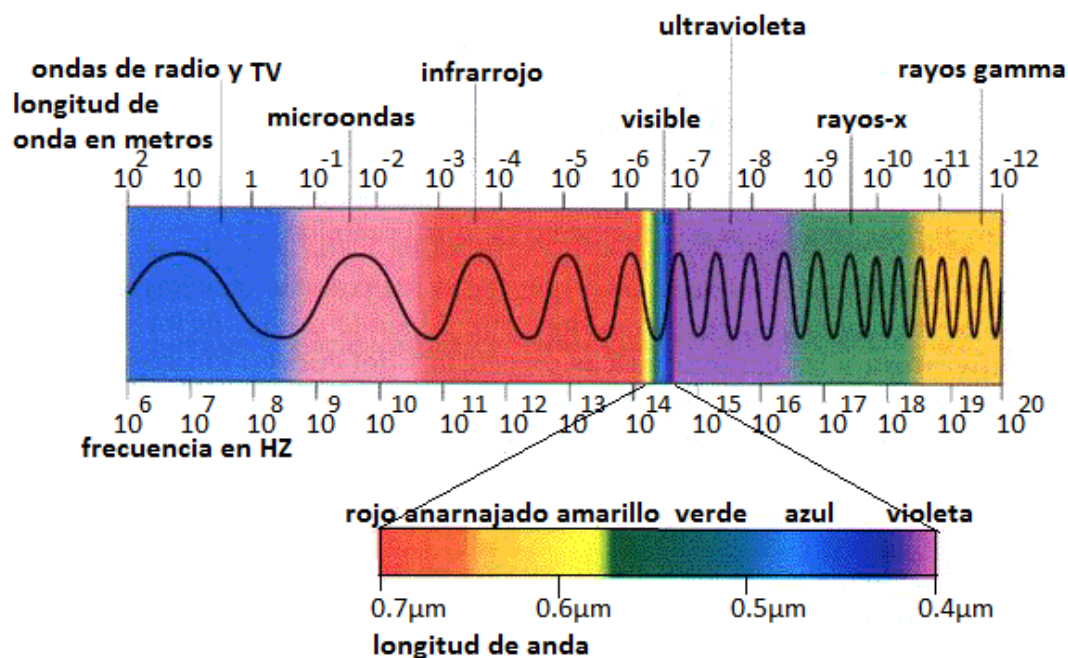
En esta región tenemos tres bandas: Azul (0,4 - 0,5  $\mu m$ ), Verde (0,5 - 0,6  $\mu m$ ), y Rojo (0,6 - 0,7  $\mu m$ ).

**B) Infrarrojo Cercano** (IRC, 0,7 - 1,3  $\mu m$ ): Es la banda que discrimina masas vegetales y concentraciones de humedad.

**C) Infrarrojo Medio** (1,3 - 8  $\mu\text{m}$ ): En esta región se entremezclan, la radiación solar y la radiación emitida por la superficie terrestre.

**D) Infrarrojo lejano o térmico** (IRT, 8 - 14  $\mu\text{m}$ ): Se detecta la radiación proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

**E) Micro-ondas** (1mm - 1m): Su energía es transparente a la cubierta nubosa.



**Figura 3. 2.** Espectro electromagnético. Fuente: Adaptado de Sobrino, 2000.

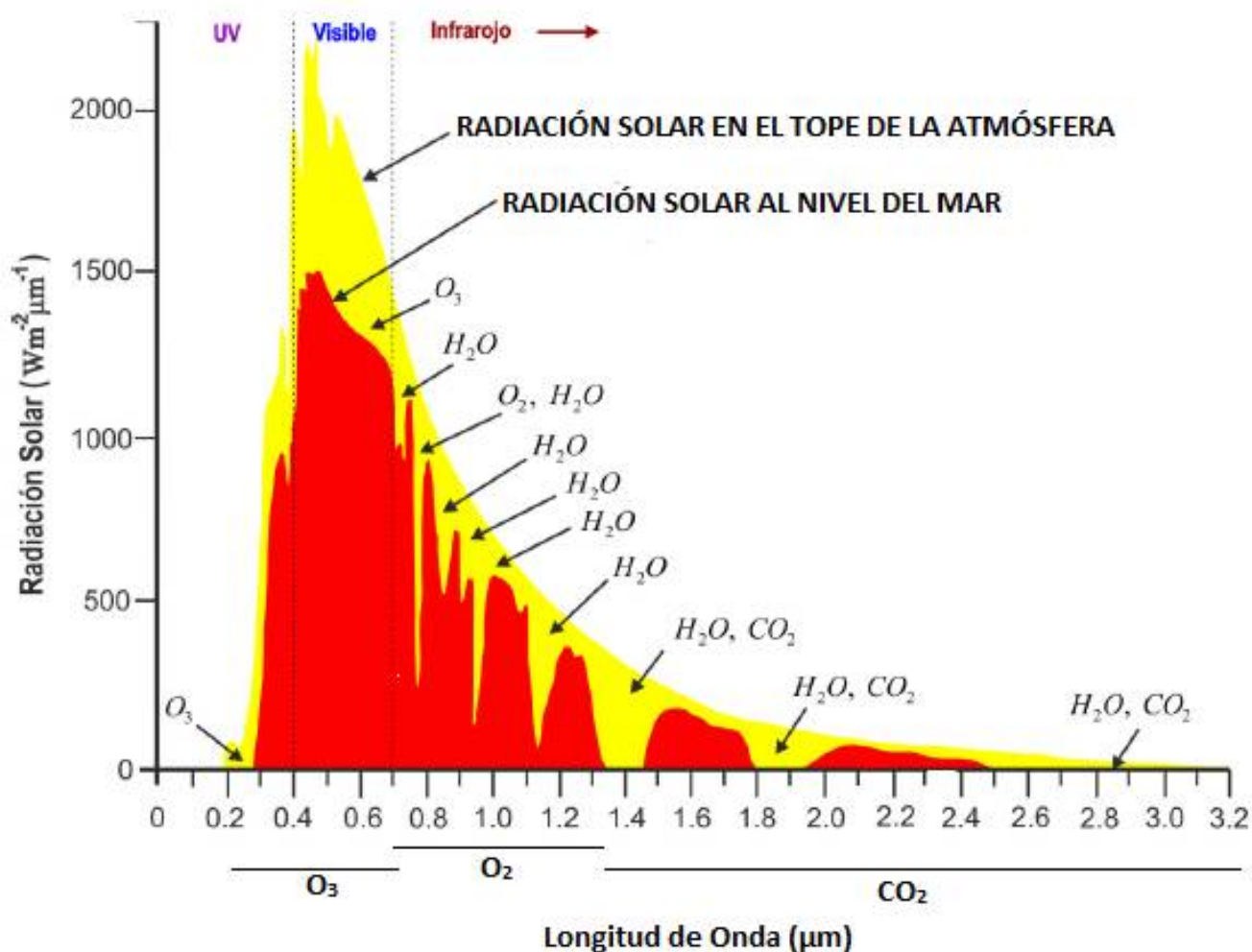
### 3.1.3. Absorción espectral

Se define como, el efecto de la atmósfera sobre un haz de energía asociado con la irradiancia solar exo-atmosférica, cuando ésta se propaga a la superficie de la Tierra.

Se considera una atmósfera idealizada cuando no exhibe efectos de absorción (sin scattering).

La absorción es el proceso de eliminar la energía (fotones) del haz por conversión irreversible de energía electromagnética a otra forma de energía (energía térmica).

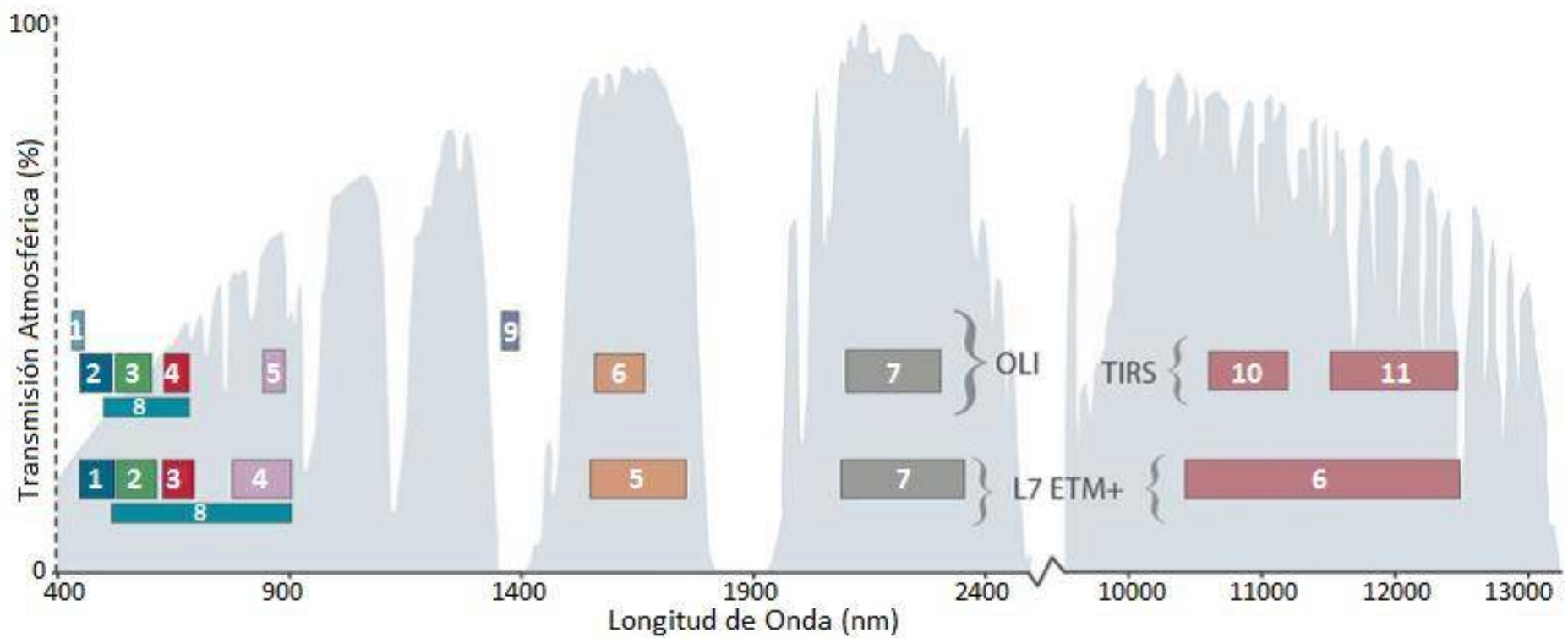
Cuando la radiación electromagnética se propaga a través de la atmósfera terrestre, presenta una absorción de fotones, por las moléculas que constituyen la atmósfera terrestre, sucede cuando un fotón induce una vibración, rotación o transición orbital del electrón en la molécula hacia un estado de energía alterna (calor). La retención de energía en el espectro solar se debe principalmente a: Vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), oxígeno ( $O_2$ ), ozono ( $O_3$ ), Metano ( $CH_4$ ), Óxido Nitroso ( $N_2O$ ). Estos gases se pueden considerar constantes y uniformemente mezclados en la atmósfera, el contenido de  $H_2O$  y  $O_3$ , depende de la posición en el espacio y el tiempo [26].

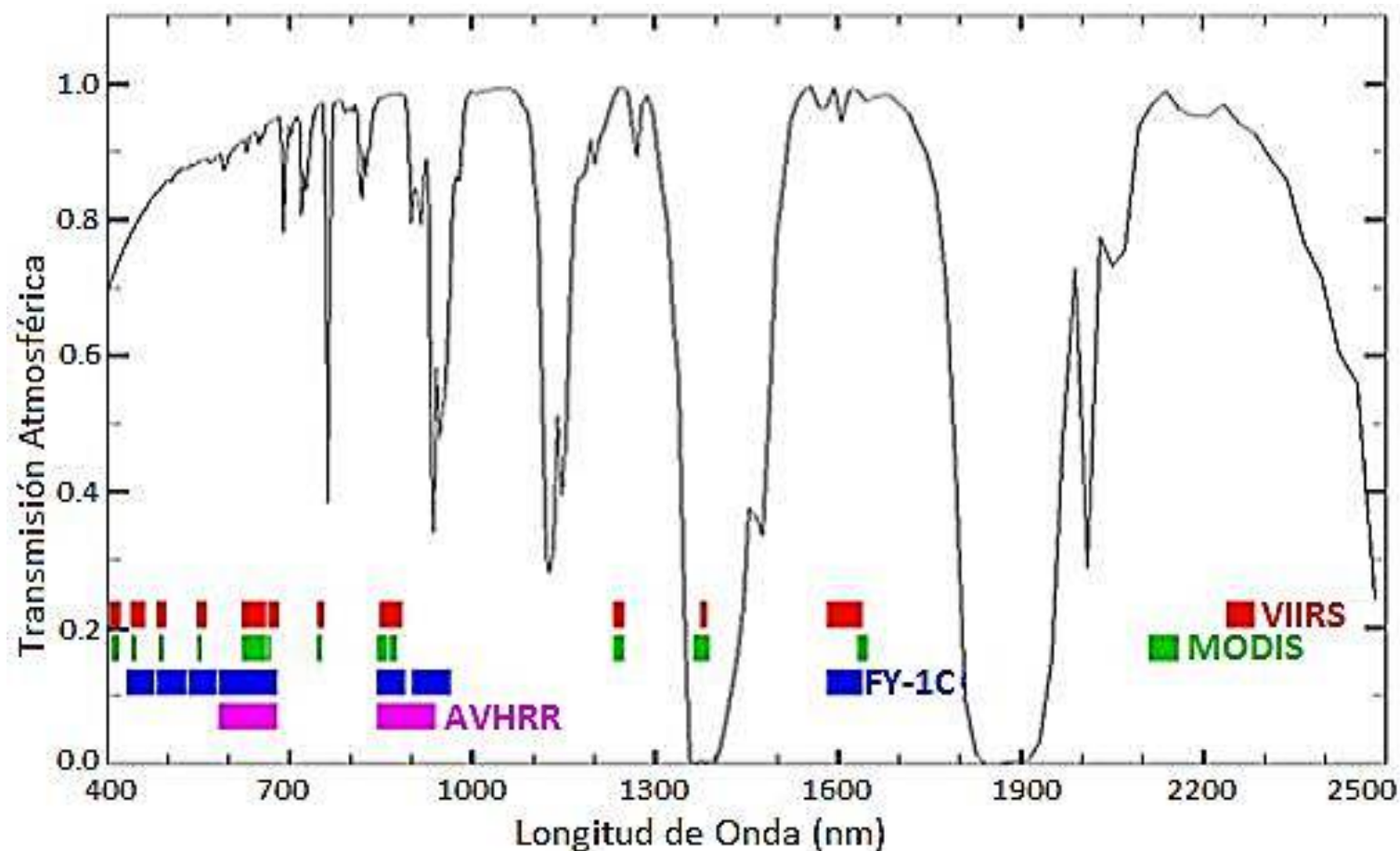


**Figura 3. 3.** Radiación solar exoatmosférica y en la superficie terrestre.

Fuente: Adaptado de Thomas y Stamnes, 1999.

La absorción espectral tiene una particular importancia en teledetección especialmente en lo relativo a sensores pasivos, que utilizan la radiación electromagnética proveniente del sol, ya que la atmósfera se comporta como un filtro selectivo, de tal forma que, algunas regiones del espectro eliminan cualquier posibilidad de observación remota, y otras regiones conocidas como ventanas atmosféricas, en donde la transmisividad de la atmósfera es suficientemente alta. En estas ventanas atmosféricas se realizan procesos de teledetección tal como se muestra en la Figura 3.3, por lo que, el diseño de los sensores espaciales tienden a ajustarse a estas regiones del espectro electromagnético, evitando interferencias al fenómeno que se pretende observar, salvo la presencia de nubes, que absorben en todo el espectro óptico, en la Figura 3.4, se muestran las ventanas atmosféricas de los sensores OLI-TIRS (LandSat-8). Este sensor presenta una mayor cantidad de bandas que el sensor ETM+, con la cual se obtiene un mejor estudio de las cubiertas en la superficie terrestre. La Figura 3.5 muestra las bandas en las cuales los sensores MODIS, VIIRS, FY-1C, AVHRR fueron construidos para el estudio de la superficie terrestre en ciertas regiones del espectro electromagnético [30].





**Figura 3. 5.** Presenta las bandas de absorción atmosférica. Dichas bandas corresponden a una región del espectro electromagnético donde los sensores han sido diseñados para obtener información de la superficie sin ningún tipo de interferencias, porque la transmitividad en estas regiones, es alta. En la Figura se puede observar que los sensores VIIRS presentan una mayor cantidad de bandas que el sensor MODIS, con la cual permite una mejor discriminación de los fenómenos que ocurren en la cubierta de la superficie terrestre.

Fuente: <https://arset.gsfc.nasa.gov/webinars/fundamentals-remote-sensing> [Acceso 13-01-2019]



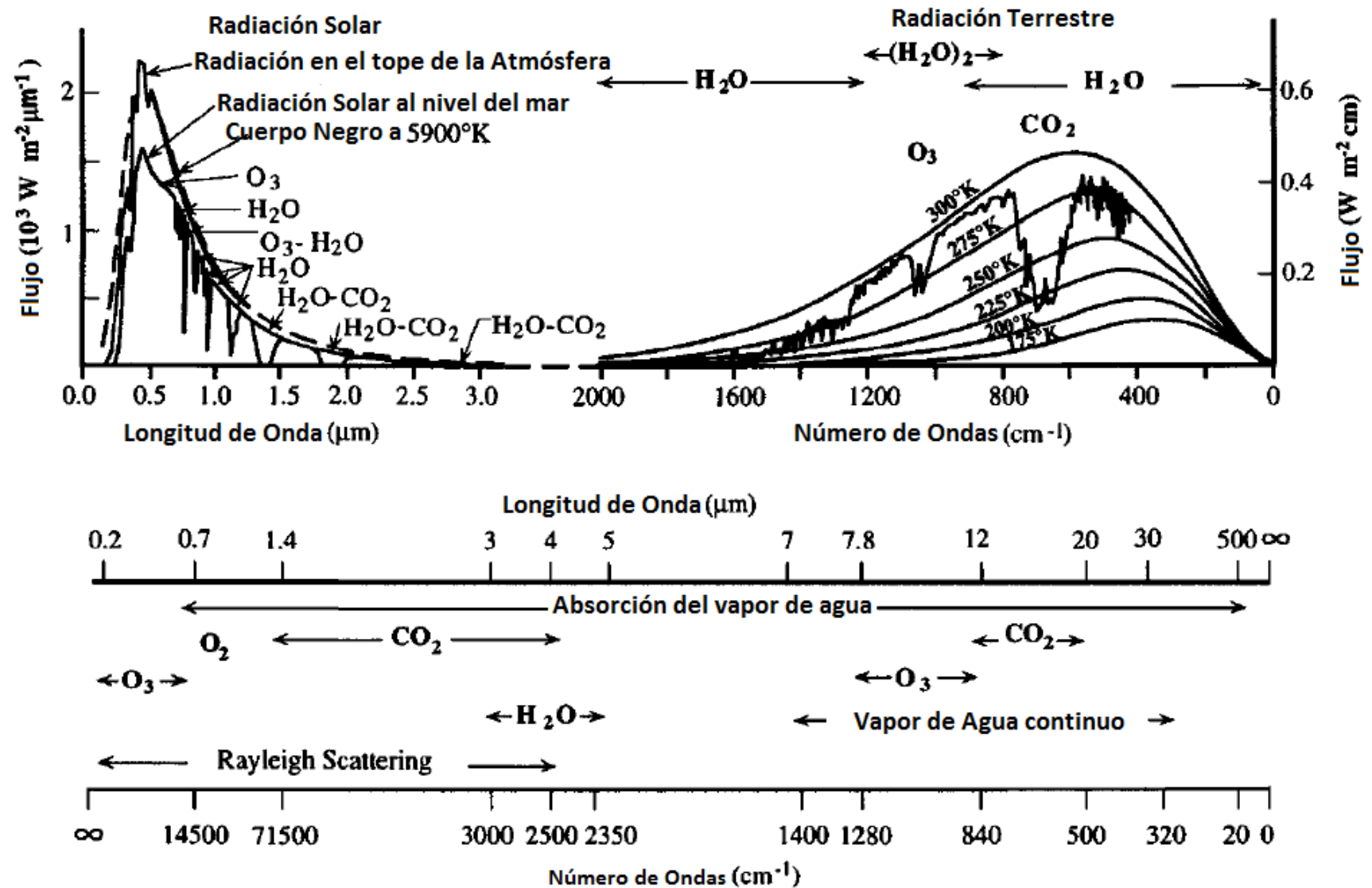
### **3.1.4. Scattering Atmosférico**

Es causada por la interacción entre la radiación electromagnética, los gases y partículas atmosféricas en suspensión.

Cuando las partículas atmosféricas son muy variables en el tiempo y en el espacio, resulta complejo cuantificar su influencia final en la imagen adquirida por el sensor, por esta razón es conveniente tener en cuenta este factor, para la conversión de los valores digitales de la imagen a parámetros físicos [5].

### **3.1.5. Emisividad Atmosférica**

Todos los cuerpos de la superficie terrestre emiten energía electromagnética con una intensidad en relación con su temperatura, radiación de onda larga (Figura 3.6), así tenemos que la emisividad ( $E$ ) es la proporción entre la energía emitida por un cuerpo y la que emitiría un cuerpo negro, a la misma temperatura [26].



**Figura 3. 6.** Distribución espectral de los campos Solar (longitud de Onda corta) y Terrestre (longitud de Onda larga). También se muestran las formas y posiciones aproximadas de las características de scattering y absorción de la atmósfera Terrestre.

Fuente: Adaptado de Thomas y Stamnes, 1999.

### **3.1.6. Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera**

El sol es la principal fuente de energía de nuestro planeta, ilumina la superficie terrestre, refleja dicha energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella. El flujo de radiación electromagnética reflejado, es recogido por el sensor que posteriormente es transmitido a las estaciones receptoras en tierra, entre el sensor y la superficie terrestre se interpone la atmósfera, que scattered y absorbe parte de la energía original [13].

Se resume en dos etapas (fuente-objeto y objeto – sensor). Tenemos los siguientes procesos atmosféricos:

#### **3.1.6.1. Scattering de Rayleigh**

El proceso scattering de Rayleigh es conocida como scattering molecular, afecta las longitudes de onda más cortas de la REM proveniente del Sol. En la atmósfera terrestre, las moléculas de nitrógeno y oxígeno actúan como dispersores y están separadas por distancias mucho mayores que sus diámetros y presentan movimientos aproximadamente aleatorios. No existe relación entre las fases de las ondas scattered por las diferentes moléculas, por tanto, sus intensidades pueden ser simplemente sumadas [26] [30] [14].

Es el principio para explicar el color “azul” del cielo en los días despejados.

#### **3.1.6.2. Scattering de Mie**

El Scattering de Mie también es dependiente de la longitud de onda. Se presenta especialmente cuando hay choque del haz incidente con aerosol y polvo atmosférico. Se habla de scattering de Mie cuando existen partículas con un diámetro similar a la longitud de onda del haz incidente. El scattering de aerosol o Mie, depende del tipo de aerosol, el tipo de aerosol depende de un índice de refracción y de la distribución del tamaño de las partículas en la atmósfera [26] [30].

### 3.1.6.3. Scattering no selectivo

El termino scattering no selectivo es usado para describir el scattering de partículas grandes comparadas a la longitud de onda de la energía electromagnética. Afecta por igual a diversas longitudes de onda, por esta razón, las nubes o nieblas tienden a aparecer blancas, ya que scattered por igual toda la luz visible [16] [26] [30].

### 3.1.7. Efecto atmosférico en la obtención de imágenes de satélite

Para el estudio de la corrección atmosférica, se evaluó las componentes relativas a la posición geográfica de la zona monitoreada, los cuales están en función de la ubicación del sensor y del Sol con respecto a un punto en el terreno. Estos componentes son: La corrección por iluminación y el ángulo cenit del satélite (ángulo de observación del satélite) [1].

La radiación solar es la energía emitida por el Sol, se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Cuando se estudia la iluminación, se habla de irradiancia (su unidad en el SI es:  $W/m^2$ ), cuando se analiza esta radiación en el sentido tierra-sensor se denomina radiancia (su unidad en el SI es:  $W/m^2.sr$ ). Cuando el sensor a bordo del satélite detecta mediante bandas (regiones espectrales) la radiación proveniente de la superficie del suelo, se denomina reflectancia espectral (su unidad en el SI es:  $W/m^2.sr.\mu m$ ), y cuando se analiza el cuerpo reflector se denomina reflectancia (adimensional) [30].

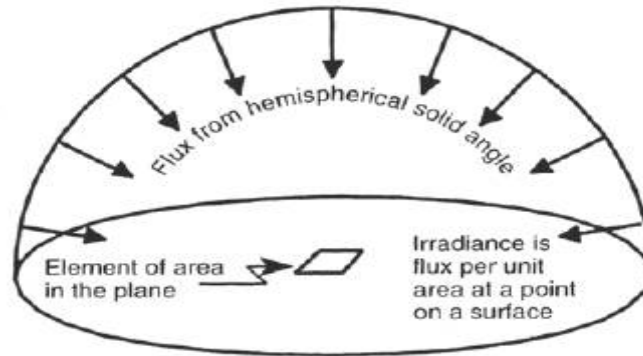
#### 3.1.7.1. Irradiancia (E)

Es la cantidad de energía radiada por el Sol sobre una unidad de área y por unidad de tiempo (sol-atmósfera-terreno) (Figura 3.7). Integrando en el tiempo, se obtiene que la irradiancia se exprese en unidades de energía por unidad de área. Se supone que en el tope de la atmosfera (TOA) incide un haz de radiación solar con intensidad (E), con una determinada dirección de iluminación sobre la tierra, por interacción de la atmósfera y el

entorno local, que al llegar al suelo puede descomponerse en tres componentes: irradiancia directa ( $E_{dir}$ ), irradiancia difusa ( $E_{dif}$ ), irradiancia del medio ambiente ( $E_{env}$ ) [5].

Se mide en  $W/m^2$ .

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad (3.10)$$



**Figura 3. 7.** El flujo radiante por unidad de área incidente en un punto de una superficie.

Fuente: Adoptado de Frulla (1993).

#### 3.1.7.1.1. Irradiancia directa ( $E_{dir}$ )

Es la radiación que llega a la superficie en forma de rayos de sol sin cambio de dirección. Es decir, la irradiancia inicial sólo sufre dentro de la atmósfera una atenuación pero el haz de radiación alcanza la superficie terrestre sin ser desviado [8].

#### 3.1.7.1.2. Irradiancia difusa ( $E_{dif}$ )

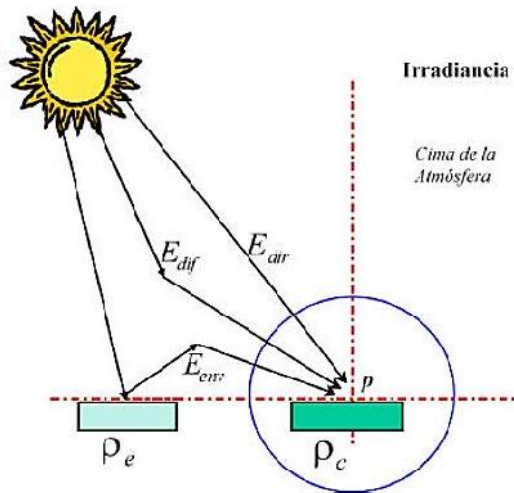
Son aquellos haces de luz que son desviados en su camino a la superficie por algún tipo de dispersión, pero que influyen en la radiación recibida por un punto en la superficie [5].

### 3.1.7.1.3. Irradiancia del entorno ( $E_{env}$ )

Se define como la radiación que sufre un proceso de scattering hacia atrás y alcanza a una superficie vecina a la que está siendo observada por satélite mostrado en la Figura 3.8.

La superposición de estas tres componentes de irradiancia da como resultado la radiación solar global incidente sobre la superficie terrestre [5].

$$E = E_{pix} + E_{atm} + E_{env} \quad (3.11)$$



**Figura 3. 8.** Las tres componentes de la Irradiancia: directa, difusa y del entorno.

Fuente: Adoptado de Frulla (1993).

### 3.1.7.2. Radiancia (L)

Se denomina radiancia, a la radiación solar cuyo recorrido viene dado de la relación superficie – atmósfera - sensor. Esta magnitud es la más importante en teledetección, ya que un sensor o detector lo que registra, es la radiancia al nivel de sensor traducida en niveles digitales que dependen de la resolución radiométrica del mismo, el cálculo de la radiancia está en función de los coeficientes de calibración del sensor, así tenemos :

$$L_s = \rho_c \frac{E}{\pi} \quad (3.12)$$

$L_s$ : Radiancia en la superficie,  $\rho_c$ : Reflectancia en la superficie y  $E$ : es la irradiancia total obtenida por la superposición de la irradiancia directa, difusa y del entorno, el resultado final dependerá del flujo de energía proveniente de la tierra hacia el sensor, lo cual derivan tres tipos de radiancia [1].

#### **3.1.7.2.1. Radiancia directa ( $L_{pix}$ )**

La radiancia directa es aquella que llega a los detectores sin sufrir desviaciones con respecto a la dirección inicial, está también llamada radiancia del pixel [5].

#### **3.1.7.2.2. Radiancia directa proveniente de la atmósfera ( $L_{atm}$ )**

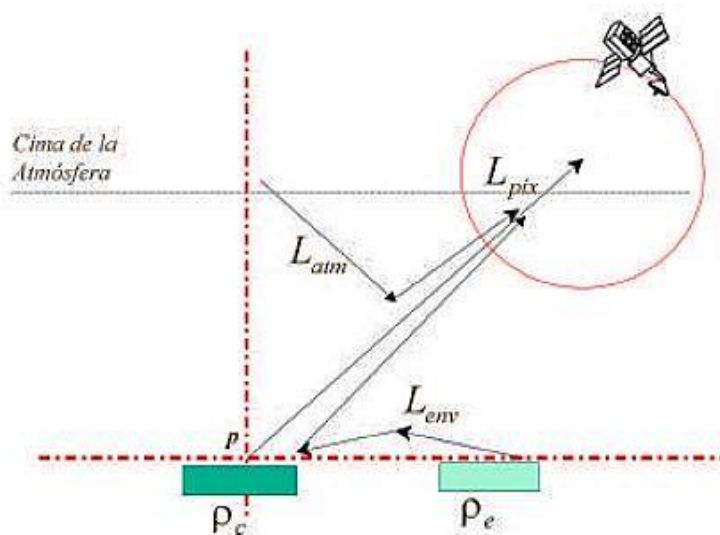
Son aquellos haces de luz que se encuentran atrapados en la atmósfera y de alguna forma radian en dirección del campo del sensor, esta radiancia directa proveniente de la atmósfera contribuye con información adicional que puede considerarse como error en la señal captada por el sensor [5].

#### **3.1.7.2.3. Radiancia proveniente del entorno ( $L_{env}$ )**

Se refiere a la radiación que es emitida por zonas vecinas al pixel observado en un instante de tiempo. Muchos algoritmos de corrección atmosférica acostumbran corregir este efecto a través de filtros que teóricamente atenúan o resaltan el efecto de adyacencia [5].

Al igual que en irradiancia la superposición de estas tres componentes da como resultado la radiancia total medida por el sensor y está notada por la ecuación 3.13, representado en la Figura 3.9.

$$L_{sensor} = L_{pix} + L_{atm} + L_{env} \quad (3.13)$$



**Figura 3. 9.** Los tres componentes de la Radiancia: directa, de la atmósfera y del medio ambiente. Fuente: Adoptado de Frulla (1993).

### 3.1.7.3. Reflectancia

La reflectancia es la razón entre la radiación reflejada y el incidente. Se consideran dos tipos de reflectancia de interés cuando se habla de correcciones atmosféricas, la reflectancia en la cima de la atmósfera (TOA), también llamada reflectancia planetaria y la reflectancia al nivel de la superficie [1].

## 3.2. La imagen de satélite

La imagen es capturada a bordo del satélite por una serie de fotodetectores eléctricos que transforman la radiancia procedente de la superficie terrestre, la radiancia recibida está en función de las características de las áreas superficiales que observa el sensor en cada instante. El valor de esta radiancia estará en función de la resolución espacial del sensor. Finalmente, la imagen almacenada será una traducción numérica denominada “números digitales”, que a su vez estará

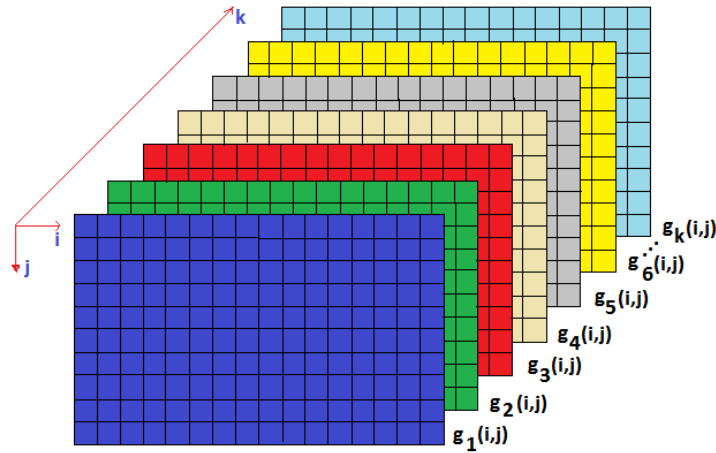


dividida en pequeñas cuadrículas con valores numéricos enteros, denominados “valores digitales”, que constituyen la unidad mínima de información de una imagen, denominada pixel [5].

### 3.2.1. Formatos de imágenes multiespectrales

Una imagen multiespectral se puede representar mediante un arreglo tridimensional de valores (píxeles). La expresión de la ecuación 3.14 explica la formación de una imagen multiespectral obtenido por un sensor a bordo de una plataforma satelital. La imagen multiespectral obtenida se representa mediante la Figura 3.10 que es una aproximación de una imagen del sensor ETM+ a bordo del satélite LandSat-7.

$$\boxed{\text{Imagen Multiespectral}} = g_k(i, j) \text{ si } \begin{cases} 1 \leq i \leq c \\ 1 \leq j \leq r \\ 1 \leq k \leq N \end{cases} \quad (3.14)$$



**Figura 3. 10.** Representación del formato de almacenamiento de valores digitales en una imagen multiespectral. Los colores representan a cada una de las bandas con sus respectivos rangos de longitudes de onda, incrementándose el valor de la longitud de onda de acuerdo al número de banda establecida.

Fuente: Adaptado de Sobrino, 2000.

Donde; “i” es el número de filas del pixel, y “j” es el número de columnas del pixel. El subíndice k denota la banda espectral, “N” indica el número de bandas.

$0 \leq g_k \leq 255$  representa los valores de resolución radiométrica de una imagen multiespectral del sensor ETM+ a bordo del satélite LandSat-7, corresponde a 8 bits de resolución radiométrica ( $2^8$ ), y  $0 \leq g_k \leq 4095$  representa los valores de resolución radiométrica de una imagen multiespectral del sensor MODIS a bordo del satélite TERRA, los valores corresponden a 12 bits de resolución radiométrica ( $2^{12}$ ).

Existen tres formas de almacenamiento para una imagen multiespectral. La explicación de cada uno de los formatos se hace utilizando una imagen obtenida del sensor ETM+, adquirida en la fecha 12/04/2002 que corresponde al día Juliano 102 del año 2002, representado en la Figura 3.11, donde también se indica la posición del pixel (900, 1167), dentro de la matriz que representa la imagen satelital, siendo la misma posición del pixel para el análisis en las cuatro

bandas. Se tomó una matriz de 8x6 que corresponden a 48 pixeles para cada una de las bandas tal como se muestra en la Figura 3.11 [5].

### **3.2.1.1. Bandas secuenciales (BSQ):**

Los números digitales se disponen uno a continuación de otro hasta completar la banda, enseguida se disponen los valores digitales de la siguiente banda y así sucesivamente hasta completar todas las bandas con las que se trabaja. Normalmente, entre banda y banda se inserta un archivo que indica el final de la banda espectral y otro de cabecero para indicar la región del espectro en la cual se está trabajando, Figura 3.12 [24].

### **3.2.1.2. Bandas Intercaladas por Línea (BIL):**

En este formato los valores digitales se organizan por líneas en lugar de bandas, disponiéndose una línea de la primera banda seguida de la primera línea de la segunda banda y así sucesivamente hasta finalizar con la primera línea de la última banda. Enseguida, se dispone la segunda línea de la primera banda y sigue el mismo procedimiento hasta completar todas las líneas de todas las bandas utilizadas en el proceso anterior, Figura 3.13 [24].

### **3.2.1.3. Bandas Intercaladas por Pixel (BIP):**

En este formato los valores digitales se organizan de una forma alternada, el primer valor de la línea 1 y banda 1 seguida del primer valor de la línea 1 y banda 2, seguida del valor de la línea 1 y banda 3, en seguida el valor 2 de la Línea 1 y Banda 1, y así sucesivamente hasta terminar con el ultimo valor de la última línea para la última banda, Figura 3.14 [24].

Banda 1 (Imagen LandSat-7 2002102 (636,386)).

63	61	61	61	56	55	56	57
61	60	60	58	55	54	56	58
60	60	61	58	56	55	56	56
59	59	60	57	56	55	58	57
56	57	58	56	55	56	57	57
53	56	53	53	54	56	57	55

Banda 2 (Imagen LandSat-7 2002102 (636, 386)).

45	45	46	45	45	45	46	48
44	44	44	44	43	45	47	48
44	43	43	44	45	45	47	47
44	43	43	43	44	45	47	47
44	44	44	44	44	45	48	46
45	45	43	43	44	44	46	43

Banda 3 (Imagen LandSat-7 2002102 (636, 386)).

34	35	34	34	33	33	34	35
35	34	36	33	33	32	34	34
34	34	35	33	34	33	34	34
33	33	33	33	33	33	34	34
33	34	34	34	32	33	33	33
35	36	33	32	31	33	33	32

Banda 4 (Imagen LandSat-7 2002102 (636, 386)).

111	109	104	106	112	114	118	124
102	101	96	104	112	111	118	121
96	84	84	98	106	108	118	118
96	75	73	92	104	107	118	120
98	99	87	102	109	111	120	119
93	93	102	110	114	116	120	112

**Figura 3. 11.** Representación de una matriz de 8x6 píxeles para cada una de las bandas, obtenidas de una imagen multiespectral debidamente procesada mediante el software de procesamiento de imágenes satelitales ENVI y el lenguaje de programación IDL. En cada una de las matrices se especifica la procedencia, la fecha y la posición de un píxel en la matriz de la imagen multiespectral inicial, tomado como referencia para las otras bandas. Fuente: Elaboración propia.

63	61	61	61	56	55	56	57	61	60	60	58	55	54	56	58	60	60	61	58	56	55	56	56
59	59	60	57	56	55	58	57	56	57	58	56	55	56	57	57	53	56	53	53	54	56	57	55
45	45	46	45	45	45	46	48	44	44	44	44	43	45	47	48	44	43	43	44	45	45	47	47
44	43	43	43	44	45	47	47	44	44	44	44	44	45	48	46	45	45	43	43	44	44	46	43
34	35	34	34	33	33	34	35	35	34	36	33	33	32	34	34	34	34	35	33	34	33	34	34
33	33	33	33	33	33	34	34	33	34	34	34	32	33	33	33	35	36	33	32	31	33	33	32
111	109	104	106	112	114	118	124	102	101	96	104	112	111	118	121	96	84	84	98	106	108	118	118
96	75	73	92	104	107	118	120	98	99	87	102	109	111	120	119	93	93	102	110	114	116	120	112

**Figura 3. 12.** Formato BSQ.

63	45	34	111	61	45	35	109	61	46	34	104	61	45	34	106	56	45	33	112	55	45	33	114
56	46	34	118	57	48	35	124	61	44	35	102	60	44	34	101	60	44	36	96	58	44	33	104
55	43	33	112	54	45	32	111	56	47	34	118	58	48	34	121	60	44	34	96	60	43	34	84
61	43	35	84	58	44	33	98	56	45	34	106	55	45	33	108	56	47	34	118	56	47	34	118
59	44	33	96	59	43	33	75	60	43	33	73	57	43	33	92	56	44	33	104	55	45	33	107
58	47	34	118	57	47	34	120	56	44	33	98	57	44	34	99	58	44	34	87	56	44	34	102
55	44	32	109	56	45	33	111	57	48	33	120	57	46	33	119	53	45	35	93	56	45	36	93
53	43	33	102	53	43	32	110	54	44	31	114	56	44	33	116	57	46	33	120	55	43	32	112
45	45	43	43	44	44	46	43	35	36	33	32	31	33	33	32	93	93	102	110	114	116	120	112

**Figura 3. 13.** Formato BIL.

**Figura 3. 14.** Formato BIP. Fuente: Elaboración propia.

## IV Materiales y métodos

En el siguiente capítulo, se hace una presentación de los datos utilizados, para cumplir con los objetivos planteados. Se utilizó imágenes satelitales del sensor ETM+ a bordo del satélite Landsat-7, imágenes de alta resolución espacial (pixel de 30 m x 30 m). Estas imágenes fueron importantes para la localización de las áreas de cultivos de arroz. Las imágenes MODIS ayudaron a comprobar que dichas áreas, obtenidas mediante las imágenes del sensor ETM+ Landsat-7, corresponden áreas de cultivos de arroz. Los datos de conductividad eléctrica (CE) del suelo, fueron extraídas de las áreas de cultivo de arroz dentro del área de estudio, los datos de conductividad eléctrica relacionados con los valores de reflectancia espectral de imágenes del sensor ETM+, ayudan a localizar, áreas de cultivo de arroz, mediante mapas temáticos de CE del suelo.

### 4.1. Imágenes del sensor ETM+ a bordo del satélite LandSat-7

Las imágenes del sensor ETM+ son de acceso libre, obtenidas por cortesía de la Administración Nacional Aero-Espacial de los Estados Unidos (NASA), a través de la página web <https://earthexplorer.usgs.gov> [Ultimo acceso, 5 de enero 2018] con (Path=10, Row=65; Latitud =7,2, Longitud = 80,0). Las características de cada imagen utilizada se detallan en la tabla 4.1., el porcentaje de nubosidad presente en la imagen en el momento de la adquisición, es un detalle importante. Para este estudio sólo se escogieron las imágenes que no poseen nubes en el área de estudio durante el periodo 2001 - 2014 que representa un total de 71 imágenes.

#### **Tabla 4. 1.**

*Características generales y porcentajes de nubosidad de imágenes del sensor ETM+ y TM a bordo del satélite LandSat-7 y 5, path: 10, row: 65.*

Nº	Fecha de Adquisición	Hora de Adquisición	Angulo de Elevación	Angulo de Acimut	Nubosidad %
1	2000-01-17	15:21:04	55,980	116,845	8
2	2000-03-21	15:20:54	57,540	77,490	6
3	2000-04-06	15:20:43	56,575	66,002	4
4	2000-05-08	15:20:27	52,241	49,231	20
5	2000-10-15	15:18:24	63,379	95,182	38
6	2000-10-31	15:18:39	63,218	107,619	43
7	2001-04-09	15:18:22	55,794	64,609	47
8	2002-02-07	15:17:10	55,441	106,408	32
9	2002-04-12	15:17:06	55,207	63,124	15
10	2002-05-14	15:17:00	50,735	48,278	6
11	2003-05-01	15:17:03	52,721	53,118	31
12	2004-02-29	15:17:26	56,439	92,966	9
13	2004-03-16	15:17:33	56,741	81,499	2
14	2004-04-17	15:17:26	54,621	59,734	6
15	2004-09-24	15:16:54	60,518	78,663	49
16	2004-10-26	15:17:05	63,009	103,886	3
17	2004-11-27	15:17:22	59,748	120,566	60
18	2005-01-14	15:17:41	55,205	117,161	46
19	2005-04-04	15:17:56	56,065	67,990	2
20	2005-04-20	15:17:49	54,360	58,097	35
21	2006-01-01	15:18:03	55,858	120,948	6
22	2006-02-02	15:18:18	55,476	109,102	10
23	2006-02-18	15:18:22	56,175	99,912	11
24	2006-04-23	15:18:18	54,059	56,540	1
25	2006-05-09	15:18:21	51,673	49,581	4
26	2006-05-25	15:18:21	49,320	45,367	0
27	2006-09-30	15:17:43	61,571	82,761	41
28	2006-12-03	15:18:24	59,129	121,925	48
29	2007-02-05	15:18:40	55,652	107,682	7
30	2007-02-21	15:18:45	56,379	98,143	1
31	2007-05-12	15:18:41	51,303	48,584	6
32	2007-05-28	15:18:33	49,005	44,828	2
33	2007-11-20	15:18:27	61,005	118,228	32
34	2007-12-22	15:18:37	56,809	122,616	24
35	2008-02-08	15:18:36	55,721	106,154	18
38	2008-11-22	15:17:32	60,439	119,090	6
39	2009-01-25	15:18:02	55,346	112,847	24
40	2009-03-14	15:18:26	57,036	83,048	19
41	2009-04-15	15:18:38	55,174	60,795	30
42	2009-05-17	15:18:44	50,552	46,951	3
43	2010-02-13	15:20:11	56,426	103,097	37
44	2010-03-01	15:20:20	57,181	92,569	16
45	2010-04-02	15:20:30	56,848	69,118	9
46	2010-04-18	15:20:30	55,227	58,794	28

47	2010-07-23	15:20:31	48,720	48,138	48
48	2010-10-11	15:20:38	63,647	91,490	12
49	2011-03-04	15:21:50	57,719	90,556	41
50	2011-05-07	15:21:54	52,790	49,459	27
51	2011-06-08	15:21:53	48,431	42,851	47
52	2011-12-01	15:22:01	60,345	122,275	14
53	2012-02-19	15:22:26	57,293	99,730	3
54	2012-03-06	15:22:23	57,932	88,522	44
55	2012-10-16	15:24:02	64,805	96,214	14
56	2012-11-01	15:24:08	64,478	109,115	39
57	2013-01-04	15:24:27	57,111	121,243	40
58	2013-02-21	15:24:27	57,937	97,948	2
59	2013-03-09	15:24:26	58,498	86,352	6
60	2013-04-26	15:24:12	54,884	53,443	45
61	2013-09-17	15:23:58	60,920	72,450	20
62	2013-12-22	15:24:40	58,175	123,757	0
63	2014-03-28	15:25:14	58,345	71,906	2
64	2014-04-13	15:25:21	56,934	60,695	22
65	2014-05-15	15:25:37	52,157	45,818	2
66	2014-05-31	15:25:41	49,901	42,596	39
67	2014-07-18	15:25:50	49,132	45,749	13
68	2014-09-20	15:26:01	61,984	74,072	64
69	2014-10-06	15:26:13	64,585	87,013	57
70	2014-11-07	15:26:32	64,532	113,232	35
71	2014-12-25	15:26:49	58,353	123,820	2

Nº	Fecha de Adquisición	Hora de Adquisición	Angulo de Elevación	Angulo de Acimut	Nubosidad %
36	2008-04-20	15:17:29	54,314	58,005	5
37	2008-05-06	15:17:02	51,907	50,712	22

Datos obtenidos de las imágenes del sensor ETM+ de LandSat-7. Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. Características generales de las imágenes LandSat

Los sensores TM y ETM+ pertenecen a la segunda generación del programa LandSat, denominado Thematic Mapper (TM), diseñado para la cartografía temática. Al igual que su predecesor, el MSS, el Thematic Mapper es un equipo de barrido multiespectral. Frente al MSS, el TM aumenta el número de detectores, de 24 a 100, a la vez que se reduce el Campo de Visión Instantáneo (IFOV), se aumenta los niveles de codificación, y se realiza el barrido en dos dimensiones. Todo ello le permite mejorar la resolución espectral, espacial y radiométrica: de 79





LandSat-2	22/01/75 28/02/82	917	18	Idéntico al LandSat-1		
LandSat-3	05/03/78 31/03/83	917	18	RBV	(1) 0,5 0,75	40
				MSS	(4) 0,5 0,6	79
					(5) 0,6 0,7	79
					(6) 0,7 0,8	79
					(7) 0,8 1,1	79
					(8) 10,4 12,6	240
LandSat-4	16/07/82 (83)	705	16	MSS	(4) 0,5 0,6	82
					(5) 0,6 0,7	82
					(6) 0,7 0,8	82
					(7) 0,8 1,1	82
				TM	(1) 0,45 0,52	30
					(2) 0,52 0,60	30
					(3) 0,63 0,69	30
					(4) 0,76 0,9	30
					(5) 1,55 1,75	30
					(6) 10,4 12,5	120
					(7) 2,08 2,35	30
LandSat-5				Idéntico al LandSat-4		
LandSat-6	05/10/93 05/10/93	705	16	Fallos en el sistema		
LandSat-7	15/04/99	705	16	ETM+	(1) 0,45 0,52	30
					(2) 0,53 0,61	30
					(3) 0,63 0,69	30
					(4) 0,78 0,9	30
					(5) 1,55 1,75	30
					(6) 10,4 12,5	120
					(7) 2,09 2,35	30
					PAN 0,5 0,90	15

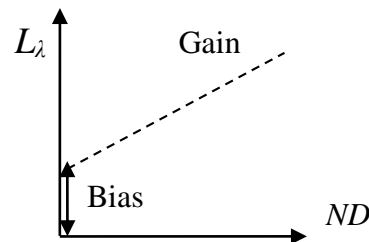
Fuente: Chander et al., 2009.

#### 4.3. Procesamiento de imágenes del sensor ETM+ a bordo del satélite LandSat-7

Para obtener datos geofísicos como reflectancia espectral del suelo es necesario realizar un procesamiento automatizado de las imágenes, para corregir errores geométricos y radiométricos causados por el sensor y la atmósfera terrestre, para este fin se utilizó la información técnica proporcionada por el satélite para cada una de las imágenes, y mediante el software ENVI 5.1 y el lenguaje de programación IDL 8.3 obtener imágenes de reflectancia espectral del suelo en la zona de estudio.

#### 4.3.1. Calibración radiométrica de las imágenes del sensor ETM+

En el instante de la obtención de la imagen, se producen distorsiones radiométricas relacionadas con la iluminación, la composición y estructura de la atmósfera. Para que sean válidas las comparaciones entre imágenes satelitales de diferente fecha de adquisición, éstas deben ser corregidas radiométricamente. Uno de los procedimientos más comunes para este fin, consiste en convertir los números digitales  $ND$  de cada píxel a valores de radiancia espectral. Las imágenes obtenidas del sensor ETM+ a bordo del satélite LandSat-7 contienen números digitales. El proceso de conversión de números digitales a valores de radiancia espectral requirió de la información de la ganancia (Gain) y del sesgo (Bias) del sensor para cada banda. Éstas constantes forman parte de un conjunto de información técnica que acompaña a cada imagen llamada “Header”. El valor del Gain representa la pendiente de la recta de calibración que se muestra en la Figura 4.1, mientras que el Bias define la radiancia espectral del sensor para un valor de  $ND$  igual a cero [4].



**Figura 4. 1.** Representación gráfica de  $L_\lambda$  Radiancia vs ND. Fuente: Chander et al., 2009.

El valor de Radiancia espectral ( $L_\lambda$ ) para cada pixel se calculó mediante la ecuación 4.1, propuesta por Chuvieco (2002), la que se expresa en  $W/m^2.sr.\mu m$ .

$$L_\lambda = Gain(ND) + Bias \quad (4.1)$$

La variable Gain está dado por la ecuación 4.1:

$$Gain = \frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{cal \max} - Q_{cal \min}} \quad (4.2)$$

Mientras que la variable Bias está dado por la ecuación 4.2.

$$Bias = L_{\min \lambda} - \left( \frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{cal \max} - Q_{cal \min}} \right) Q_{cal \min} \quad (4.3)$$

Al remplazar la ecuación 4.2 y 4.3 en 4.1 tendremos:

$$L_{\lambda} = \left( \frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{cal \max} - Q_{cal \min}} \right) (ND) + L_{\min \lambda} - \left( \frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{cal \max} - Q_{cal \min}} \right) Q_{cal \min} \quad (4.4)$$

Factorizando la ecuación 4.4 se obtiene la siguiente ecuación:

$$L_{\lambda} = \left( \frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{cal \max} - Q_{cal \min}} \right) (ND - Q_{cal \min}) + L_{\min \lambda} \quad (4.5)$$

En la Tabla 4.3 se muestra la descripción de cada una de las variables que intervienen en la ecuación 4.5 para la obtención de la Radiancia espectral [4].

**Tabla 4. 3.**

*Descripción de los coeficientes (variable) que intervienen en la obtención de la Radiancia espectral. Los coeficientes de la ecuación 4.5 se encuentran en la hoja de características de cada imagen satelital, estos coeficientes son proporcionados por el satélite.*

Coeficiente de Calibración	Descripción
$L_{\lambda}$	Radiancia espectral (w/m <sup>2</sup> .sr.μm)
$ND$	Nivel Digital (valores que conforman la imagen de cada una de las bandas)
$L_{\max \lambda}$	Radiancia espectral máxima en la banda $\lambda$ , presente en la hoja de característica.
$L_{\min \lambda}$	Radiancia espectral mínima en la banda $\lambda$ , presente en la hoja de característica.
$Q_{cal \max}$	Nivel digital máximo calibrado
$Q_{cal \min}$	Nivel digital mínimo calibrado

Fuente: Chander et al., 2009.

Los datos imágenes de los satélites Landsat-5 y 7 fueron procesados por dos sistemas (Software de procesamiento de imágenes satelitales): El sistema *National LandSat Archive Production*

*System* (NLAPS) y *Level 1 Product Generation System* (LPGS). Los datos imágenes procesados en el sistema NLAPS presentan los siguientes valores:  $Q_{cal\min}=0$  y  $Q_{cal\max}=255$ . Los datos imágenes procesados en el sistema LPGS presentan los siguientes valores:  $Q_{cal\min}=1$  y  $Q_{cal\max}=255$ . El sensor ETM+ tiene una característica muy importante, trabaja con dos detectores en dos modos de ganancia, alto (High) o bajo (Low) con la finalidad de no saturarse en el instante en que los valores de iluminación son elevados si las condiciones de iluminación son altas. Los fotodetectores trabajan con ganancia baja, cuando las condiciones de iluminación son bajas, trabajan con alta ganancia. Cuando el investigador adquiere una imagen del satélite LandSat, dentro de la imagen multiespectral se encuentra una hoja de característica de la misma, donde se encuentran todos los coeficientes de calibración utilizados en las ecuaciones 4.2, 4.3 y 4.5 para cada una de las bandas de la imagen multiespectral. Observando los valores  $L_{\min\lambda}$  y  $L_{\max\lambda}$  en la hoja de características (metadato) y comparando con los valores presentes en las Tablas 4.4 y 4.5, se decide si se trabaja en modo de ganancia alta o baja [4].

**Tabla 4. 4.**

*Rango espectral del sensor ETM+,  $L_{\min\lambda}$  y  $L_{\max\lambda}$ , en modo de alta ganancia (LPGS), Irradiancia solar exoatmosférica  $ESUN_{\lambda}$ .*

# Banda	Rango espectral ( $\mu\text{m}$ )	$L_{\min\lambda}$ W/(m <sup>2</sup> .sr. $\mu\text{m}$ )	$L_{\max\lambda}$ W/(m <sup>2</sup> .sr. $\mu\text{m}$ )	Irradiancia solar exoatmosférica $ESUN_{\lambda}$ W/(m <sup>2</sup> . $\mu\text{m}$ )
1	0,452–0,514	-6,20	191,60	1997
2	0,519 – 0,601	-6,40	196,50	1812
3	0,631 – 0,692	-5,00	152,90	1533
4	0,772 – 0,898	-5,10	157,40	1039
5	1,547 – 1,748	-1,00	31,06	230,8
6	10,31 –12,36	3,20	12,65	N/A
7	2,065 –2,346	-0,35	10,80	84,90
8(PAN)	0,515 – 0,896	-4,70	158,30	1362

Fuente: Chander et al., 2009.

Las 25 imágenes del sensor ETM+ que se utilizó en este trabajo de tesis, son del tipo LPGS de baja ganancia. Para la conversión de los números digitales a valores de Radiancia espectral se empleó un programa en el lenguaje de programación IDL, con nombre de archivo “*nd\_a\_radiancia.PRO*” que se encuentra en el Anexo E. Mediante este algoritmo es posible utilizar todos los coeficientes presentes en la hoja de características para obtener una imagen de radiancia espectral de las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7; las bandas 6 y 8 no fueron utilizadas, estas pertenecen a la banda térmica que ideal para estudios de temperatura superficial del suelo. La banda 8, es la banda Pancromática que abarca las bandas 1, 2, 3 y 4.

**Tabla 4. 5.**

*Rango espectral del sensor ETM+,  $L_{\min \lambda}$  y  $L_{\max \lambda}$ , en modo de baja ganancia (LPGS), Irradiancia solar exoatmosférica  $ESUN_{\lambda}$  [4].*

# Banda	Rango espectral ( $\mu\text{m}$ )	$L_{\min \lambda}$ $\text{W}/(\text{m}^2.\text{sr}.\mu\text{m})$	$L_{\max \lambda}$ $\text{W}/(\text{m}^2.\text{sr}.\mu\text{m})$	Irradiancia solar exoatmosférica $ESUN_{\lambda} \text{ W}/(\text{m}^2.\mu\text{m})$
1	0,452 – 0,514	-6,20	293,70	1997
2	0,519 – 0,601	-6,40	300,90	1812
3	0,631 – 0,692	-5,00	234,40	1533
4	0,772 – 0,898	-5,10	241,10	1039
5	1,547 – 1,748	-1,00	47,57	230,8
6	10,31 – 12,36	0,00	17,04	N/A
7	2,065 – 2,346	-0,35	16,54	84,90
8(PAN)	0,515 – 0,896	-4,70	243,10	1362

Fuente: Chander et al., 2009.

#### 4.3.1.1. Conversión de radiancia a reflectancia planetaria en imágenes del sensor

##### ETM+

Los valores de la radiancia espectral de las imágenes TM y ETM+ pueden ser convertida en reflectancia planetaria usando la siguiente formula [30].

$$\rho_p = \frac{\pi x L x d^2}{ESUN_{\lambda} x \cos \theta} \quad (4.6)$$

Dónde:

$\rho_P$ : Es la reflectancia planetaria,  $L$ : es la radiancia espectral en la apertura del sensor,  $ESUN_\lambda$ : Es la irradiancia exoatmosférica solar promedio de cada banda,  $\theta$ : Es el ángulo cenital solar,  $d_n$ : Es el día del año,  $d$ : Es la distancia Tierra - Sol, que puede ser calculada a través de la ecuación.

$$d = (1 - 0,01672 \times \cos(RADIAN(0,9856 \times (d_n - 4))))^2 \quad (4.7)$$

#### 4.3.1.2. Corrección atmosférica mediante el módulo FLAASH

Los números digitales de los pixeles en una imagen contienen los efectos de la interacción de la radiación con la atmósfera. Por lo tanto, si se desea obtener información sobre la superficie terrestre, es necesario realizar una corrección atmosférica de los datos imagen. La radiancia registrada por el sensor puede ser parametrada de acuerdo a la siguiente expresión [3]:

$$L_{sensor} = \frac{A \cdot \rho}{1 - S \cdot \langle \rho \rangle} + \frac{B \cdot \langle \rho \rangle}{1 - S \cdot \langle \rho \rangle} + L_{atm} \quad (4.8)$$

Dónde:

$L_{sensor}$ : Radiancia registrada por el sensor,  $\rho$ : Reflectancia de la superficie en un pixel,  $\langle \rho \rangle$ : Reflectancia promedio del pixel y de las regiones vecinas,  $S$ : Albedo esférico de la atmósfera,  $L_{atm}$ : Radiancia que corresponde a la dispersión de la atmósfera superior,  $A$  y  $B$ : Coeficientes independientes de la superficie y que varían con las condiciones atmosféricas y geométricas.

Los valores de  $A$ ,  $B$ ,  $S$  y  $L_{atm}$  son determinados por el código MODTRAN 4 a partir del ángulo acimutal y de elevación del Sol, del ángulo de visión del satélite, de la elevación promedio del área de estudio (datos obtenidos del header), del modelo atmosférico y de aerosol elegido y de la altura de visibilidad. Una vez determinados estos valores por el código

MODTRAN 4 y considerando  $\rho = \langle \rho \rangle$  en la ecuación (4.8), el valor de la reflectancia promedio  $\langle \rho \rangle$  se puede estimar en función de la radiancia promedio de la imagen,  $\langle L \rangle$  [3].

$$\langle L \rangle = \frac{(A + B) \cdot \langle \rho \rangle}{1 - S \cdot \langle \rho \rangle} \quad (4.9)$$

La radiancia promedio de la imagen  $\langle L \rangle$  es determinada a partir de una función de distribución de dispersión del punto. Una vez determinada la reflectancia promedio  $\langle \rho \rangle$  con la ecuación (4.9), su valor se reemplaza en la ecuación (4.8) para determinar la reflectancia  $\rho$  de cada pixel. En la Figura 4.3 se muestra la guía del módulo FLAASH del software ENVI [3].

#### 4.3.1.3. Requerimientos del módulo FLAASH

Los valores digitales de los pixeles en una imagen multispectral, contienen los efectos de interacción radiación-atmósfera, por lo tanto es necesario hacer una corrección atmosférica de los datos imágenes, para obtener información de la superficie del suelo, mediante la reflectancia espectral. El modelo de corrección atmosférica FLAASH opera en el rango espectral de 0,4 a 2,5 micrómetros [3].

El módulo FLAASH, del software ENVI 5.1, está representado mediante una interfaz gráfica en donde se especifica todos los parámetros a utilizar. La imagen que será corregida atmosféricamente, debe encontrarse en valores de radiancia espectral, y en formato punto flotante, los valores de radiancia espectral debe tener unidades de  $\mu W / cm^2 .sr.nm$ . El formato de la imagen satelital, debe ser BIL o en formato BIP. Para poder obtener las unidades que requiere el módulo FLAASH, se hace, los cálculos respectivos para poder obtener el factor de escala que necesita el módulo FLAASH. La imagen a corregir atmosféricamente presenta unidades de  $W / m^2 .sr.\mu m$ .



$$\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m} x (Factor de escala) = \frac{\mu W}{cm^2 \cdot sr \cdot nm}$$

Simplificando las unidades iguales y reemplazando los valores respectivos en notación

científica.

$$\frac{1}{m^2 \cdot 10^{-6} \cdot m} x (Factor de escala) = \frac{10^{-6}}{10^{-4} \cdot m^2 \cdot 10^{-9} \cdot m}$$

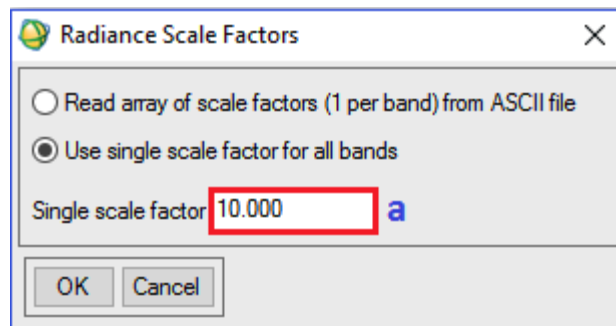
Simplificando se tiene:

$$(Factor de escala) = \frac{10^{-12}}{10^{-13}}$$

$$(Factor de escala) = 10$$

Las imágenes satelitales, TM y ETM+ a corregir atmosféricamente mediante el módulo FLAASH, son divididas por el factor de escala que es igual a 10 [4]. La Figura 4.2, muestra la interfaz gráfica que presenta el módulo FLAASH, en el contorno rojo, muestra la forma como debe ingresarse el factor de escala. La Figura 4.3 muestra la interfaz gráfica del módulo FLAASH, en contorno rojo, las variables que se necesita para realizar la corrección atmosférica de la imagen multiespectral, estas variables son las siguientes:

a) Factor de escala



**Figura 4. 2.** Factor de escala para realizar el cambio de unidades de la imagen a clasificar. Fuente: Chander et al., 2009.

- b) Coordenadas geográficas del centro de la escena.
- c) Tipo de sensor: Multiespectral-LandSat TM7.
- d) Altura del sensor: 705 km.

- e) Altura sobre el nivel del mar del área de estudio: 0.150 km.
- f) Tamaño del pixel: 30 m.
- g) Fecha de adquisición de la imagen: 10-09-2007.
- h) Hora de adquisición de la imagen: 15:17:20.
- i) Modelo de aerosol: Rural.
- j) Visibilidad: 40 km.
- k) Modelo atmosférico: Tropical.

FLAASH Atmospheric Correction Model Input Parameters

Input Radiance Image: C:\Users\Rodrigo\Desktop\Carpetas\TESIS DEFINITIVA\Tesis 2017\Corregido 2007\2007\_324\RAD\_BIL

Output Reflectance File: D:\Rodrigo\TESIS\2007\_324\RAD\_BIL\_FLAASH

Output Directory for FLAASH Files: C:\Users\Rodrigo\Desktop\

Rootname for FLAASH Files:

**b** Scene Center Location DD <-> DMS **c** Sensor Type Landsat TM7 **g** Flight Date

Lat -6 41 10.53 **d** Sensor Altitude (km) 705.000 Oct 10 2007

Lon -79 50 56.25 **e** Ground Elevation (km) 0.150 **h** Flight Time GMT (HH:MM:SS)

**f** Pixel Size (m) 30.000 15:17:20

**k** Atmospheric Model Tropical **i** Aerosol Model Rural

Water Retrieval No ↑↓ Aerosol Retrieval None

Water Column Multiplier 1.00 **j** Initial Visibility (km) 40.00

Apply Cancel Help Multispectral Settings... Advanced Settings... Save... Restore...

**Figura 4. 3.** Información necesaria para realizar una corrección atmosférica por el modelo FLAASH del software ENVI 5.1. Fuente: Chander et al., 2009.

#### 4.3.1.4. Metadato de una imagen del sensor ETM+ a bordo del satélite LandSat-7

Con la finalidad de validar cada uno de los datos de obtenidos mediante el satélite se presenta la ficha técnica (metadato) de la imagen del sensor ETM+ a bordo del satélite LandSat-7. Obtenida por cortesía del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) a

través del portal web: <https://earthexplorer.usgs.gov>, con acceso el 19/03/2018. La imagen fue captada por el sensor en la fecha 20/11/2007 como se resalta en la ficha técnica, correspondiente a la imagen 33 de la tabla 4.1.

```

GROUP = L1_METADATA_FILE
GROUP = METADATA_FILE_INFO
  ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
  REQUEST_ID = "0101503174691_00695"
  LANDSAT_SCENE_ID = "LE70100652007324EDC04"
  FILE_DATE = 2015-03-19T02:45:47Z
  STATION_ID = "EDC"
  PROCESSING_SOFTWARE_VERSION = "LPGS_12.6.0"
  DATA_CATEGORY = "NOMINAL"
END_GROUP = METADATA_FILE_INFO
GROUP = PRODUCT_METADATA
  DATA_TYPE = "L1T"
  ELEVATION_SOURCE = "GLS2000"
  OUTPUT_FORMAT = "GEOTIFF"
  EPHEMERIS_TYPE = "DEFINITIVE"
  SPACECRAFT_ID = "LANDSAT_7"
  SENSOR_ID = "ETM"
  SENSOR_MODE = "BUMPER"
  WRS_PATH = 010
  WRS_ROW = 065
  DATE_ACQUIRED = 2007-11-20
  SCENE_CENTER_TIME = "15:18:27.6123634Z"
  CORNER_UL_LAT_PRODUCT = -6.28579
  CORNER_UL_LON_PRODUCT = -81.16725
  CORNER_UR_LAT_PRODUCT = -6.28202
  CORNER_UR_LON_PRODUCT = -79.00602
  CORNER_LL_LAT_PRODUCT = -8.17456
  CORNER_LL_LON_PRODUCT = -81.16795
  CORNER_LR_LAT_PRODUCT = -8.16964
  CORNER_LR_LON_PRODUCT = -78.99773
  CORNER_UL_PROJECTION_X_PRODUCT = 481500.000
  CORNER_UL_PROJECTION_Y_PRODUCT = -694800.000
  CORNER_UR_PROJECTION_X_PRODUCT = 720600.000
  CORNER_UR_PROJECTION_Y_PRODUCT = -694800.000
  CORNER_LL_PROJECTION_X_PRODUCT = 481500.000
  CORNER_LL_PROJECTION_Y_PRODUCT = -903600.000
  CORNER_LR_PROJECTION_X_PRODUCT = 720600.000
  CORNER_LR_PROJECTION_Y_PRODUCT = -903600.000
  PANCHROMATIC_LINES = 13921
  PANCHROMATIC_SAMPLES = 15941
  REFLECTIVE_LINES = 6961

```

```

REFLECTIVE_SAMPLES = 7971
THERMAL_LINES = 6961
THERMAL_SAMPLES = 7971
FILE_NAME_BAND_1 = "LE70100652007324EDC04_B1.TIF"
FILE_NAME_BAND_2 = "LE70100652007324EDC04_B2.TIF"
FILE_NAME_BAND_3 = "LE70100652007324EDC04_B3.TIF"
FILE_NAME_BAND_4 = "LE70100652007324EDC04_B4.TIF"
FILE_NAME_BAND_5 = "LE70100652007324EDC04_B5.TIF"
FILE_NAME_BAND_6_VCID_1 =
"LE70100652007324EDC04_B6_VCID_1.TIF"
FILE_NAME_BAND_6_VCID_2 =
"LE70100652007324EDC04_B6_VCID_2.TIF"
FILE_NAME_BAND_7 = "LE70100652007324EDC04_B7.TIF"
FILE_NAME_BAND_8 = "LE70100652007324EDC04_B8.TIF"
GROUND_CONTROL_POINT_FILE_NAME =
"LE70100652007324EDC04_GCP.txt"
METADATA_FILE_NAME = "LE70100652007324EDC04_MTL.txt"
CPF_NAME = "L7CPF20071001_20071231.15"
END_GROUP = PRODUCT_METADATA
GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
CLOUD_COVER = 32.00
IMAGE_QUALITY = 9
SUN_AZIMUTH = 118.22754130
SUN_ELEVATION = 61.00504588
EARTH_SUN_DISTANCE = 0.9880833
GROUND_CONTROL_POINTS_VERSION = 1
GROUND_CONTROL_POINTS_MODEL = 120
GEOMETRIC_RMSE_MODEL = 3.792
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_Y = 2.624
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_X = 2.737
END_GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 293.700
RADIANCE_MINIMUM_BAND_1 = -6.200
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 300.900
RADIANCE_MINIMUM_BAND_2 = -6.400
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 234.400
RADIANCE_MINIMUM_BAND_3 = -5.000
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 241.100
RADIANCE_MINIMUM_BAND_4 = -5.100
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 47.570
RADIANCE_MINIMUM_BAND_5 = -1.000
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_6_VCID_1 = 17.040
RADIANCE_MINIMUM_BAND_6_VCID_1 = 0.000
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_6_VCID_2 = 12.650
RADIANCE_MINIMUM_BAND_6_VCID_2 = 3.200
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 16.540

```

```

RADIANCE_MINIMUM_BAND_7 = -0.350
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_8 = 243.100
RADIANCE_MINIMUM_BAND_8 = -4.700
END_GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
GROUP = MIN_MAX_REFLECTANCE
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 0.457272
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_1 = -0.009653
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 0.501037
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_2 = -0.010657
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 0.464734
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_3 = -0.009913
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 0.708327
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_4 = -0.014983
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 0.646455
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_5 = -0.013590
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 0.618217
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_7 = -0.013082
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_8 = 0.544651
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_8 = -0.010530
END_GROUP = MIN_MAX_REFLECTANCE
GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
  QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_1 = 255
  QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_1 = 1
  QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_2 = 255
  QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_2 = 1
  QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_3 = 255
  QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_3 = 1
  QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_4 = 255
  QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_4 = 1
  QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_5 = 255
  QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_5 = 1
  QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_6_VCID_1 = 255
  QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_6_VCID_1 = 1
  QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_6_VCID_2 = 255
  QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_6_VCID_2 = 1
  QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_7 = 255
  QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_7 = 1
  QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_8 = 255
  QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_8 = 1
END_GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
GROUP = PRODUCT_PARAMETERS
  CORRECTION_GAIN_BAND_1 = "CPF"
  CORRECTION_GAIN_BAND_2 = "CPF"
  CORRECTION_GAIN_BAND_3 = "CPF"
  CORRECTION_GAIN_BAND_4 = "CPF"
  CORRECTION_GAIN_BAND_5 = "CPF"
  CORRECTION_GAIN_BAND_6_VCID_1 = "CPF"

```

```

CORRECTION_GAIN_BAND_6_VCID_2 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_7 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_8 = "CPF"
CORRECTION_BIAS_BAND_1 = "INTERNAL_CALIBRATION"
CORRECTION_BIAS_BAND_2 = "INTERNAL_CALIBRATION"
CORRECTION_BIAS_BAND_3 = "INTERNAL_CALIBRATION"
CORRECTION_BIAS_BAND_4 = "INTERNAL_CALIBRATION"
CORRECTION_BIAS_BAND_5 = "INTERNAL_CALIBRATION"
CORRECTION_BIAS_BAND_6_VCID_1 = "INTERNAL_CALIBRATION"
CORRECTION_BIAS_BAND_6_VCID_2 = "INTERNAL_CALIBRATION"
CORRECTION_BIAS_BAND_7 = "INTERNAL_CALIBRATION"
CORRECTION_BIAS_BAND_8 = "INTERNAL_CALIBRATION"
GAIN_BAND_1 = "L"
GAIN_BAND_2 = "L"
GAIN_BAND_3 = "L"
GAIN_BAND_4 = "L"
GAIN_BAND_5 = "L"
GAIN_BAND_6_VCID_1 = "L"
GAIN_BAND_6_VCID_2 = "H"
GAIN_BAND_7 = "L"
GAIN_BAND_8 = "L"
GAIN_CHANGE_BAND_1 = "LL"
GAIN_CHANGE_BAND_2 = "LL"
GAIN_CHANGE_BAND_3 = "LL"
GAIN_CHANGE_BAND_4 = "LL"
GAIN_CHANGE_BAND_5 = "LL"
GAIN_CHANGE_BAND_6_VCID_1 = "LL"
GAIN_CHANGE_BAND_6_VCID_2 = "HH"
GAIN_CHANGE_BAND_7 = "LL"
GAIN_CHANGE_BAND_8 = "LL"
GAIN_CHANGE_SCAN_BAND_1 = 0
GAIN_CHANGE_SCAN_BAND_2 = 0
GAIN_CHANGE_SCAN_BAND_3 = 0
GAIN_CHANGE_SCAN_BAND_4 = 0
GAIN_CHANGE_SCAN_BAND_5 = 0
GAIN_CHANGE_SCAN_BAND_6_VCID_1 = 0
GAIN_CHANGE_SCAN_BAND_6_VCID_2 = 0
GAIN_CHANGE_SCAN_BAND_7 = 0
GAIN_CHANGE_SCAN_BAND_8 = 0
END_GROUP = PRODUCT_PARAMETERS
GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.1807E+00
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.2098E+00
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 9.4252E-01
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 9.6929E-01
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 1.9122E-01
RADIANCE_MULT_BAND_6_VCID_1 = 6.7087E-02

```

```

RADIANCE_MULT_BAND_6_VCID_2 = 3.7205E-02
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 6.6496E-02
RADIANCE_MULT_BAND_8 = 9.7559E-01
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -7.38071
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -7.60984
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -5.94252
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -6.06929
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -1.19122
RADIANCE_ADD_BAND_6_VCID_1 = -0.06709
RADIANCE_ADD_BAND_6_VCID_2 = 3.16280
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -0.41650
RADIANCE_ADD_BAND_8 = -5.67559
REFLECTANCE_MULT_BAND_1 = 1.8383E-03
REFLECTANCE_MULT_BAND_2 = 2.0145E-03
REFLECTANCE_MULT_BAND_3 = 1.8687E-03
REFLECTANCE_MULT_BAND_4 = 2.8477E-03
REFLECTANCE_MULT_BAND_5 = 2.5986E-03
REFLECTANCE_MULT_BAND_7 = 2.4854E-03
REFLECTANCE_MULT_BAND_8 = 2.1858E-03
REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = -0.011491
REFLECTANCE_ADD_BAND_2 = -0.012671
REFLECTANCE_ADD_BAND_3 = -0.011782
REFLECTANCE_ADD_BAND_4 = -0.017831
REFLECTANCE_ADD_BAND_5 = -0.016188
REFLECTANCE_ADD_BAND_7 = -0.015567
REFLECTANCE_ADD_BAND_8 = -0.012716
END_GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
GROUP = THERMAL_CONSTANTS
  K1_CONSTANT_BAND_6_VCID_1 = 666.09
  K2_CONSTANT_BAND_6_VCID_1 = 1282.71
  K1_CONSTANT_BAND_6_VCID_2 = 666.09
  K2_CONSTANT_BAND_6_VCID_2 = 1282.71
END_GROUP = THERMAL_CONSTANTS
GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
  MAP_PROJECTION = "UTM"
  DATUM = "WGS84"
  ELLIPSOID = "WGS84"
  UTM_ZONE = 17
  GRID_CELL_SIZE_PANCHROMATIC = 15.00
  GRID_CELL_SIZE_REFLECTIVE = 30.00
  GRID_CELL_SIZE_THERMAL = 30.00
  ORIENTATION = "NORTH UP"
  RESAMPLING_OPTION = "CUBIC_CONVOLUTION"
  SCAN_GAP_INTERPOLATION = 2.0
END_GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
END_GROUP = L1_METADATA_FILE
  END

```

#### 4.4. Imágenes MODIS

En esta sección se explica la obtención y el procesamiento de las imágenes MODIS, producto de NDVI.

El producto MOD13Q1v005 del sensor MODIS fue obtenido por cortesía del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), a través de la interfaz web MRTweb en la siguiente dirección: <https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appears/> El producto MOD13Q1v005, contenido en un formato de dato científico HDF, donde se encuentran los datos imágenes en formato GEOTIFF, junto al *metadata* (hoja de características de cada imagen, contiene toda la información necesaria de la imagen del sensor), que contiene los índices de vegetación EVI y NDVI, la resolución espacial de ambos productos es 250 x 250 m. correspondiente al tamaño del pixel. Los productos son máximo compuesto de 16 días, obteniéndose 23 datos imágenes por año, para cubrir el tiempo de estudio. Desde enero del año 2001 hasta diciembre del año 2014 se obtuvieron 644 datos imágenes, 322 imágenes de EVI y 322 imágenes de NDVI, se utilizó el software ENVI 5.1 y el lenguaje de programación IDL para extraer los datos imágenes del formato HDF, lo cual da inicio al pre procesamiento de los datos imágenes MODIS.

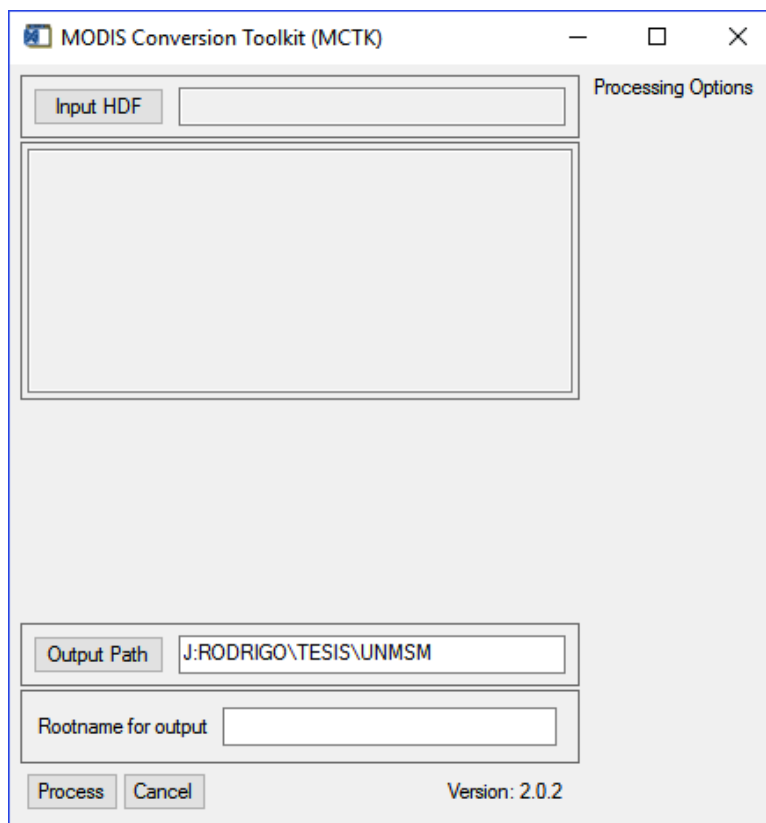
##### 4.4.1. Procesamiento de Imágenes MODIS

Para el procesamiento de datos imágenes MODIS, producto de NDVI máximo valor compuesto de 16 días, se utiliza el software de procesamiento de imágenes ENVI y el lenguaje de programación IDL, mediante un programa que automatiza el módulo “*MODIS Conversion Toolkit*” (MCTK) desarrollado por Devin White [31], el cual ayudó a maximizar la rapidez de procesamiento imágenes producto de NDVI.



#### 4.4.2. Módulo “MODIS Conversion Toolkit”

El *MODIS Reprojection toolkit* es una herramienta desarrollada por *Devin White* utilizada para procesar y georreferenciar todos los productos MODIS, incluyendo los productos compatibles: “*Level 1A Uncalibrated Radiance*”, “*L1B Calibrated Radiance*”, “*Level 2 Swath-Level 2G*”, “*Level 3*” y “*Level 4 Grid*”, los archivos MODIS se cargan mediante una interfaz gráfica instalada en el software ENVI. EL MCTK mostrado en la Figura 4.4, se basa en el “*MODIS Reprojection Tools*” (MRT) y “*MODIS Reprojection Tool Swath*” (MRT Swath), La interfaz gráfica proporciona una lista de todos los conjuntos de datos disponibles a utilizar, las funcionalidades del MRT se pueden agrupar en: reproyección, remuestreo, conversiones de formato y creación de mosaicos, sólo aplicables a datos MODIS en formato HDF-EOS. El MRT Swath tiene las mismas funcionalidades que el *MRT*, sin embargo está enfocado al manejo de datos Swath y gránulos. Además es necesario tener el archivo MOD03 que contiene toda la información de geolocalización del Swath o granulo a proyectar, y considerar que el MRT Swath no soporta datos de 32 bits [31].



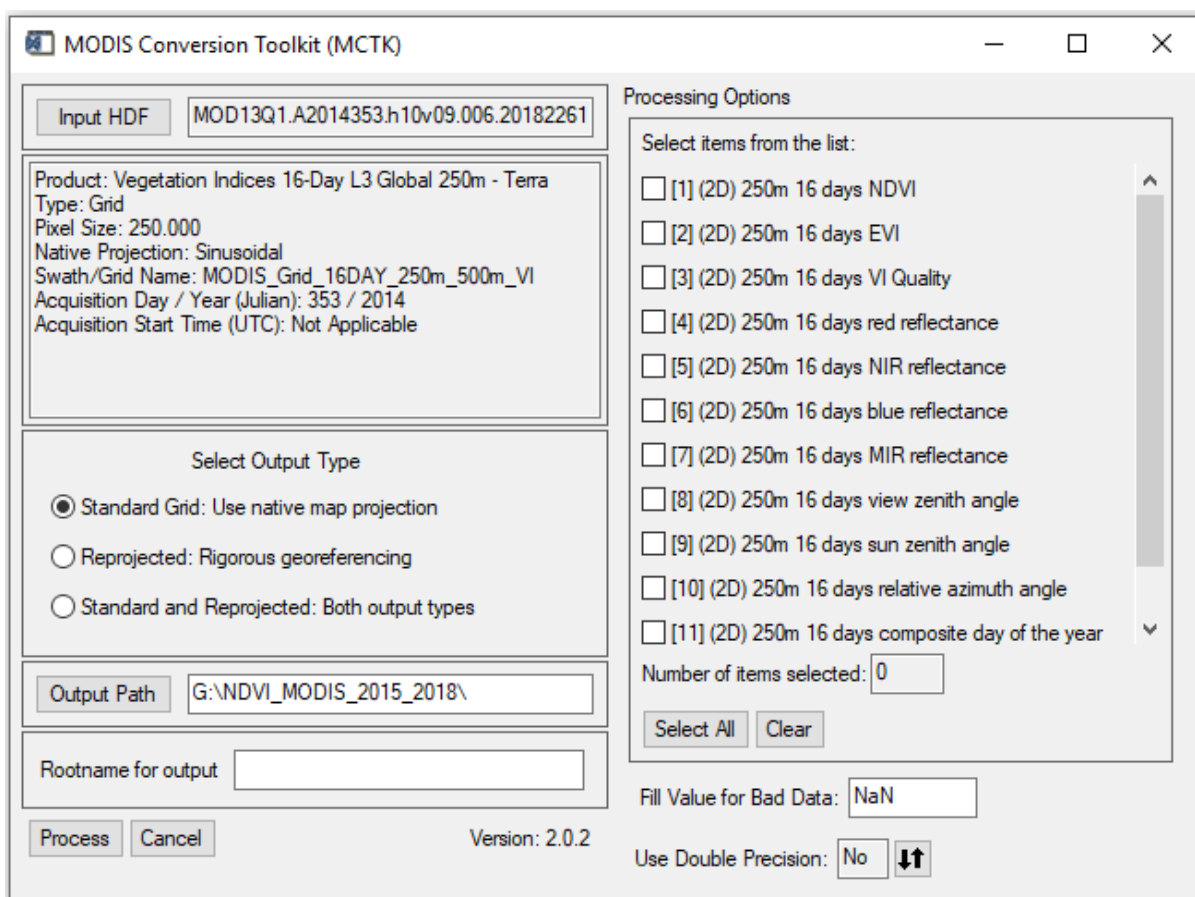
**Figura 4. 4.** Ventana del entorno de trabajo del MCTK. Las opciones correspondientes se actualizan cuando se carguen los archivos del producto MODIS.

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.4.3. Obtención de datos imágenes MODIS Nivel 4 usando el módulo MCTK**

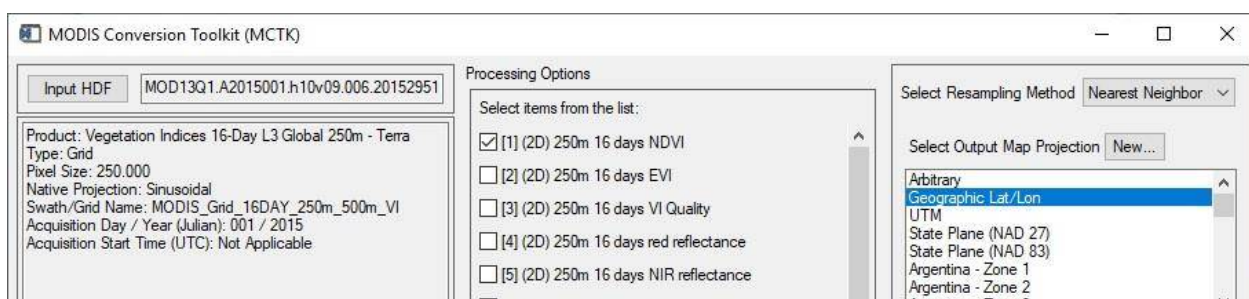
El módulo MCTK está diseñado de tal modo que ya tiene un filtro de archivos preestablecidos. Sólo se muestra un cuadro de diálogo para la selección del producto a trabajar, cuando se carga sólo un archivo que comience con el carácter “M” y la extensión “HDF”. Cuando se suministra un archivo MODIS al MCTK, los diversos campos de la interfaz se actualizan (Figura 4. 4), debajo del botón Input HDF aparece el metadato de la imagen producto de NDVI introducida. Las opciones de georreferenciación para los datos convertidos aparecen debajo del metadato, donde por defecto se activa un tipo según el producto ingresado. Las opciones de procesamiento aparecen al lado derecho del visor del metadato, es una lista

interactiva según el procedimiento que se requiera dar al archivo ingresado, uno de ellos es elegido. La lista mostrada es diferente para cada producto MODIS con la cual se quiera trabajar. Si la imagen (MOD03) de geolocalización está incluido dentro del archivo (producto MODIS) y una de las opciones de procesamiento es elegido, la ventana se expandirá para incluir una sección donde se podrá controlar otros parámetros como el tipo de proyección, el método de remuestreo, manejo de los puntos “warp” y el tamaño de pixel [31].



**Figura 4. 5.** MCTK con un archivo de procesamiento HDF Nivel 4 (Producto de NDVI MODIS/TERRA) suministrado.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4. 6.** MCTK con un archivo de procesamiento HDF Nivel 4 (Producto de NDVI MODIS/TERRA) suministrado. Se muestra un conjunto de datos con diferentes dimensiones y resoluciones espaciales.

Fuente: Elaboración propia.

Las dimensiones de cada conjunto de datos presentes en el archivo aparecen a la izquierda de su respectivo nombre en la lista, 2D o 3D Figura 4.5. Y Figura 4. 6. Si la escala y el “Offset” están presentes en un conjunto de datos, este se aplica en forma automática durante el proceso de conversión [31].

#### 4.5. Medida de la conductividad eléctrica del suelo

La conductividad eléctrica es la inversa de la resistividad y su medida es el  $\frac{S}{m}$  (siemens por metro) o  $\frac{1}{\Omega.m}$ . Se utiliza para determinar la salinidad (contenido de sales) de suelos y sustratos de cultivos para lo que se disuelven en agua destilada y se mide la conductividad del medio líquido, referenciado a 25 °C en unidades del sistema Giorgi  $\frac{dS}{m}$  (decisiemens por metro) o  $\frac{10^{-1}}{\Omega.m}$ . Expresado en términos de las unidades base del S.I.  $\frac{dS}{m} = \frac{10^{-1}}{\Omega.m} = \frac{10^{-1}.A^2.s^3}{kg.m^3}$ .

La conductividad eléctrica (CE) del extracto de saturación en una muestra de suelo saturada, sirve para estimar el grado de concentración de sales solubles en el subsuelo.

Comúnmente, la conductividad eléctrica del suelo es una medida química de laboratorio, donde se especifica el grado de humedad en la muestra, para posteriormente determinar la conductividad eléctrica del extracto de suelo saturado o una relación determinada de suelo: agua destilada (1:1).

Desde el punto de vista agrícola, los suelos salinos son los que contienen suficientes sales solubles en la zona de raíz que afecta negativamente el crecimiento de las plantas, al hacer el agua del subsuelo menos disponible para su extracción por las raíces de los cultivos de arroz, debido a la reducción del potencial osmótico del agua del suelo. Las sales poseen afinidad por el agua, lo que se traduce en la necesidad del cultivo, de gastar más energía metabólica y emplear una mayor fuerza mecánica para la extracción del agua de un suelo salino [20] [21]. Para efectos de la definición, los suelos que poseen una conductividad eléctrica del extracto, mayor a 4 dS/m a 25 °C se consideran suelos con problemas de salinidad, como se muestra en la Tabla 4.6.

**Tabla 4. 6.**

*Rangos generales de las plantas tolerantes a la salinidad.*

CE (dS/m)	Clase de la salinidad	Efectos
0 - 2	No salino	Suelos en buen estado.
2 - 4	Ligeramente salino	Afecta el rendimiento de los cultivos muy sensibles.
4 - 8	Moderadamente salino	Afecta el rendimiento de la mayoría de los cultivos.
8 - 16	Fuertemente salino	Sólo se obtienen rendimientos aceptables en los cultivos tolerantes.
> 16	Extremadamente salino	Muy pocos cultivos dan rendimientos aceptables.

Fuente: Richards, 1954.

Bajo condiciones óptimas en el manejo de productividad de un cultivo, la productividad permanecerá en sus niveles potenciales, para valores óptimos de conductividad eléctrica conocido como conductividad eléctrica umbral  $CE_{Umbral}$  (Tabla 4.7). Si el valor promedio de CE en la zona de raíz del cultivo se incrementa por encima de este valor umbral crítico, se asume que la

productividad del cultivo comenzará a disminuir en proporción al incremento de la concentración de sales de diferente tipo según la ecuación matemática 4.10, presentada en la publicación de la serie de riego y drenaje FAO No 29, 2006 [21].

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - (CE - CE_{Umbral}) \cdot \frac{b}{100} \quad 4.10$$

Válida para condiciones donde  $CE > CE_{Umbral}$  donde:

$Y_a$  : Productividad real del cultivo

$Y_m$  : productividad máxima esperada del cultivo cuando  $CE < CE_{Umbral}$

$CE$  : Conductividad eléctrica promedio del extracto de suelo en la zona de raíz.

$CE_{Umbral}$  : conductividad eléctrica umbral, cuando la productividad del cultivo comienza a reducirse por primera vez debajo de  $Y_m$ .

**Tabla 4. 7.**

*Tolerancia de la salinidad en algunos cultivos.*

Cultivo	Valor umbral	10 % Pérdida de rendimiento	25 % Pérdida de rendimiento	50 % Pérdida de rendimiento	100 % Pérdida de rendimiento
	CE(dS/m)	CE(dS/m)	CE(dS/m)	CE(dS/m)	CE(dS/m)
Arroz	1,9	3,0	4,6	7,4	12,0
Algodón	7,7	9,6	13,0	17,0	27,0
Caña de azúcar	4,0	5,1	7,2	11,0	18,0
Trigo	6,0	7,4	9,5	13,0	20,0
Frijoles	1,0	1,5	2,3	3,6	6,5

Fuente: Grattan y Shannon, 2002.

#### 4.5.1. Datos de campo

Los datos de campo pertenecen a áreas de cultivos de arroz en una fecha donde los campos se encontraban en descanso (barbecho).

#### 4.5.1.1. Datos de conductividad eléctrica del suelo

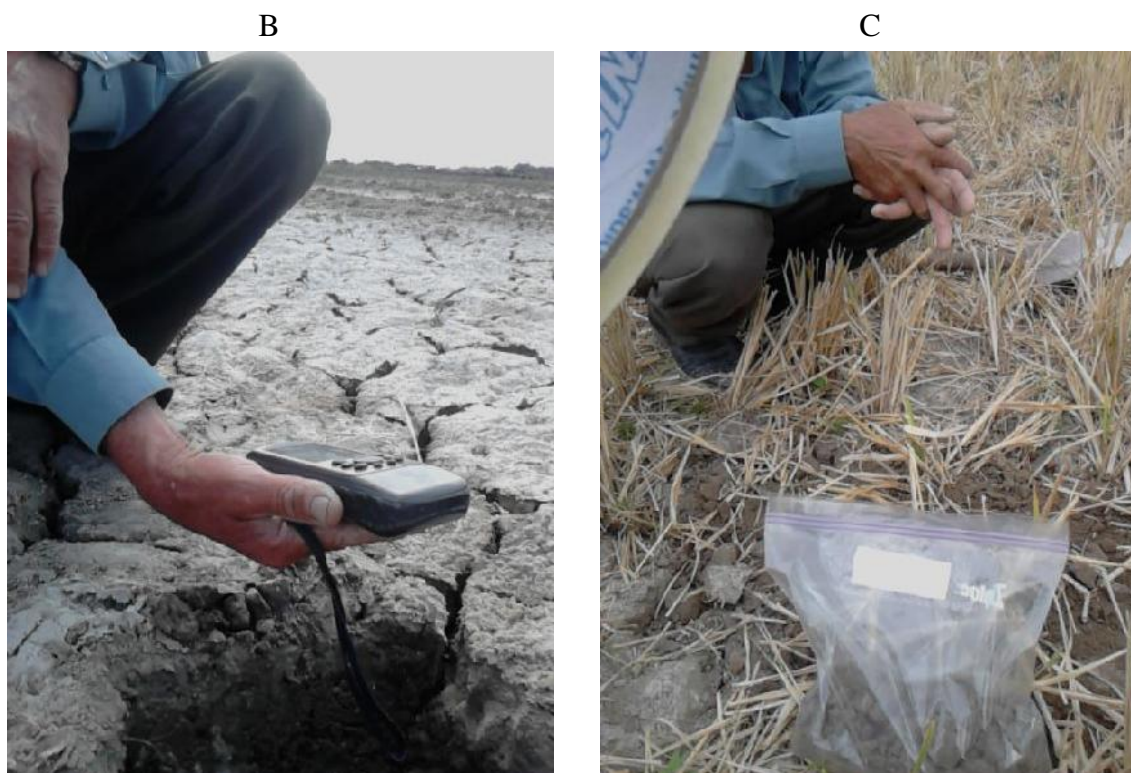
Los datos de conductividad eléctrica del suelo fueron proporcionados por el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo (UNPRG) de Lambayeque: Un total de 325 muestras en el periodo 2001 -2014. La extracción de muestras de campo corresponde a una columna vertical de muestra de suelo extraída hasta una profundidad de 0,30 m, Figura 4.7. A, en puntos estratégicos del área de estudio, dentro de las parcelas de arroz. Los puntos de muestreo fueron debidamente georreferenciados con un GPS en el sistema WGS 84 coordenadas UTM, Figura 4.8. B. Se obtuvo una muestra con un peso de 2 kilogramos aproximadamente, Figura 4.9. D. El análisis se realizó en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la UNPRG. La conductividad eléctrica se determinó del estrato del suelo de cada muestra.

Como parte del desarrollo de la tesis, se pudo obtener 20 muestras adicionales de conductividad eléctrica en suelos de cultivo de arroz (Figura 4.7) del área de estudio utilizando el mismo procedimiento de extracción anterior. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía de la UNPRG.

A



**Figura 4. 7.** Obtención de muestras de campo debidamente georreferenciados en áreas de cultivo de arroz. Figura 4.7A, en la figura se genera una pequeña calicata hasta una profundidad de 30 cm, porque a esta profundidad se encuentra la zona de raíz de los cultivos de arroz. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4. 8.** En la Figura B, se procede a georreferenciar con un GPS en el sistema WGS84 cuya posición en coordenadas UTM son: (E 615870 m – N 9261408);  $\pm 3$  m de error del equipo GPS. La Figura 4. 8. C, se extrajo aproximadamente 2 kg de muestra debidamente etiquetada, en bolsas de plástico totalmente selladas de tal manera que se conserve el estado natural de la muestra, luego se trasladó al Laboratorio de Suelos de la UNPRG, para su análisis correspondiente. En este trabajo de campo realizado en la Fecha 02/08/2015 y se obtuvieron 20 muestra de conductividad eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.



**Tabla 4. 8.**

*Número de muestras de campo tomadas en los años 2007, 2008, 2009, 2010 y 2015 pertenecientes a cultivos de arroz en el área de estudio.*

Muestras de Conductividad Eléctrica del suelo sin cultivo de arroz en la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771					
muestra N°	WGS 84 UTM zona 17S		CE (1:1) dS/m	CE (1:1) $\frac{A^2 \cdot s^3}{kg \cdot m^3}$	Fecha de muestreo
	Este (m)	Norte (m)			
1	618722	9256690	5,670	0,567	17/02/2007
2	618658	9256692	2,660	0,266	
3	618727	9256629	0,809	0,080	
4	618701	9256566	2,010	0,201	
5	618574	9256565	0,397	0,039	
6	621957	9242212	9,960	0,996	02/07/2007
7	626722	9242975	1,362	0,136	
8	618627	9257749	13,110	1,311	13/10/2007
9	618589	9257724	20,500	2,050	
10	618551	9257673	34,800	3,480	
11	618533	9257684	11,540	1,154	
12	618515	9257622	8,180	0,818	
13	618496	9257596	4,880	0,488	
14	618478	9257570	1,086	0,108	
15	618443	9257518	3,680	0,368	
16	618431	9257547	4,330	0,433	
17	618463	9257600	10,010	1,001	
18	618503	9257652	5,430	0,543	
19	618541	9257704	152,500	15,250	
20	618579	9257755	42,500	4,250	
21	618597	9257780	7,550	0,755	
22	618568	9257787	1,850	0,185	
23	618530	9257735	31,200	3,120	
24	618511	9257709	31,300	3,130	
25	618492	9257683	97,100	9,710	
26	618418	9257577	8,360	0,836	
27	618381	9257525	2,860	0,286	
28	618370	9257556	5,830	0,853	

29	618406	9257607	45,100	4,510
30	618442	9257659	73,900	7,390
31	618480	9257709	128,300	12,83
32	618499	9257735	115,500	11,550
33	618518	9257761	1,976	0,197
34	618490	9257773	17,870	1,787
35	618471	9257784	2,630	0,263
36	618452	9257722	121,700	12,170
37	618432	9257697	71,900	7,190
38	618395	9257643	156,300	16,630
39	618358	9257590	74,100	7,410
40	618346	9257623	98,000	9,800
41	618382	9257674	95,400	9,540
42	618402	9257699	73,100	7,310
43	618420	9257726	3,680	0,368
44	618447	9257815	3,930	0,393
45	618429	9257789	4,780	0,478
46	618373	9257712	19,140	1,914
47	618336	9257660	125,600	12,650
48	618317	9257635	142,300	14,230
49	618299	9257609	28,400	2,840
50	618263	9257557	6,810	0,681
51	618253	9257593	2,140	0,214
52	618290	9257647	91,100	9,110
53	618365	9257715	6,840	0,684
54	618404	9257804	1,745	0,174
55	618421	9257820	2,450	0,245
56	618394	9257839	9,300	0,930
57	618356	9257786	2,590	0,259
58	618339	9257763	64,400	6,440
59	618317	9257735	35,100	3,510
60	618298	9257709	30,700	3,070
61	618267	9257681	52,200	5,220
62	618251	9257657	125,100	12,510
63	619413	9263179	0,408	0,040
64	619251	9263097	0,287	0,028
65	619229	9263069	0,208	0,020
66	619246	9263011	0,435	0,043
67	619278	9263061	0,401	0,040
68	619419	9263256	0,297	0,029
69	619164	9263168	0,284	0,028
70	619345	9263243	0,308	0,030

---

71	619397	9263278	0,393	0,039
72	619369	9263222	0,328	0,032
73	619215	9263163	0,425	0,042
74	619161	9263132	0,394	0,039
75	619097	9263232	0,340	0,034
76	619199	9263257	0,301	0,030
77	619202	9263054	0,601	0,060
78	619269	9263192	1,297	0,129
79	619416	9263217	1,256	0,125
80	619438	9263196	0,584	0,058
81	619206	9263089	0,701	0,070
82	619273	9263026	0,599	0,059
83	619390	9263200	0,608	0,060
84	619373	9263298	0,508	0,050
85	619382	9263085	1,073	0,107
86	619355	9263070	0,908	0,090
87	619187	9263147	0,645	0,064
88	619381	9263524	0,479	0,047
89	619292	9263169	0,536	0,053
90	619358	9263145	0,473	0,047
91	619322	9263264	1,491	0,149
92	619365	9263181	0,529	0,052
93	619179	9263075	0,854	0,085
94	619326	9263303	0,741	0,074
95	619388	9263161	0,892	0,089
96	619372	9263259	0,908	0,090
97	619183	9263110	0,534	0,053
98	619203	9263292	1,468	0,146
99	619260	9263120	0,871	0,087
100	619246	9263213	0,989	0,098
101	619336	9263166	1,415	0,142
102	619300	9263244	1,487	0,487
103	619344	9263203	0,502	0,050
104	619156	9263097	0,671	0,067
105	619224	9263032	0,895	0,089
106	619263	9263159	0,594	0,059
107	619219	9263199	0,807	0,080
108	619237	9263141	1,397	0,139
109	619134	9263117	0,840	0,084
110	619395	9263239	1,147	0,115
111	619277	9263265	0,553	0,055
112	619093	9263196	0,506	0,051

---

113	619231	9263348	2,770	0,277
114	619210	9263327	2,180	0,218
115	619328	9263055	2,680	0,268
116	619302	9263040	2,590	0,259
117	619070	9263217	2,900	0,290
118	619210	9263125	1,583	0,158
119	619233	9263104	1,798	0,179
120	619432	9263120	2,450	0,245
121	619192	9263184	2,460	0,246
122	619272	9263341	2,570	0,257
123	619347	9263322	1,807	0,181
124	619300	9263287	1,645	0,165
125	619406	9263102	1,805	0,181
126	619223	9263236	1,948	0,195
127	619302	9263323	1,995	0,199
128	619118	9263255	2,150	0,215
129	619276	9263306	2,050	0,205
130	619315	9263187	1,825	0,183
131	619077	9265252	4,030	0,403
132	619150	9263263	3,130	0,313
133	619080	9263313	3,940	0,394
134	619067	9263180	3,941	0,394
135	619173	9263241	15,170	1,517
136	619197	9263220	10,710	1,071
137	619116	9263175	34,400	3,440
138	619119	9263211	12,040	1,204
139	619146	9263227	15,350	1,535

---

140	622734	9260581	3,710	0,371
141	622313	9260338	2,440	0,244
142	621590	9260079	4,430	0,443
143	622003	9260027	2,050	0,205
144	623694	9260500	3,150	0,315
145	624041	9260505	2,520	0,252
146	623030	9260118	5,260	0,526
147	623142	9259706	2,490	0,249
148	623341	9260045	4,070	0,407
149	623562	9259870	4,000	0,400
150	622908	9259455	2,540	0,254
151	622890	9259048	1,930	0,193
152	622363	9258781	4,990	0,499
153	623528	9259287	2,420	0,242
154	623699	9259022	2,990	0,299
155	624325	9258796	5,050	0,505

---

18/10/2007

156	624795	9258616	4,070	0,407
157	625110	9258392	1,480	0,148
158	621681	9260311	4,440	0,444
159	621830	9260250	4,540	0,454
160	621978	9260395	1,770	0,177
161	622231	9260537	3,390	0,339
162	622442	9260507	1,750	0,175
163	622978	9260671	3,560	0,356
164	624298	9260443	3,350	0,335
165	622173	9260205	1,740	0,174
166	622801	9259999	4,940	0,494
167	623446	9260192	3,090	0,309
168	623713	9260117	3,460	0,346
169	623221	9259891	3,830	0,383
170	623504	9259681	2,040	0,204
171	623326	9259503	3,770	0,377
172	622918	9259265	4,710	0,471
173	622743	9258944	3,620	0,362
174	622437	9258946	4,150	0,415
175	624107	9259034	2,950	0,295
176	624482	9258662	6,850	0,685
177	625077	9264397	1,760	0,176
178	625136	9264427	1,150	0,115
179	625200	9264394	18,780	1,878
180	625263	9264422	1,750	0,175
181	625262	9264362	4,210	0,421
182	625292	9264458	1,320	0,132
183	625353	9264362	3,910	0,391
184	625355	9264423	1,010	0,101
185	625385	9264516	11,500	1,150
186	625387	9264454	10,630	1,063
187	625389	9264395	11,890	1,189
188	625422	9264362	4,690	0,469
189	625452	9264427	4,320	0,432
190	625474	9264482	6,140	0,614
191	625546	9264514	3,800	0,380
192	625476	9264545	14,030	1,403
193	625515	9264391	5,360	0,536
194	625543	9264360	7,540	0,754
195	625571	9264599	9,330	0,933
196	625557	9264415	4,660	0,466
197	625593	9264527	2,980	0,298
198	625599	9264527	4,360	0,436
199	625636	9264441	5,020	0,502
200	625638	9264380	6,980	0,698
201	625718	9264623	13,270	1,327

---

202	625774	9264538	4,970	0,497	18/10/2007
203	625844	9264459	3,640	0,364	
204	625896	9264677	5,880	0,588	
205	624913	9264221	4,270	0,427	
206	625218	9264235	7,280	0,728	
207	625261	9264087	7,990	0,799	
208	624793	9264018	1,280	0,128	
209	624439	9263957	1,860	0,186	
210	625155	9263898	6,990	0,699	
211	624795	9263791	5,640	0,564	
212	624212	9263596	3,070	0,307	
213	623615	9263547	5,070	0,507	
214	624452	9263777	4,090	0,409	
215	624826	9263564	8,610	0,861	
216	618026	9257000	2,990	0,299	
217	617833	9257062	0,374	0,037	
218	617638	9257686	0,736	0,074	
219	617924	9257662	3,590	0,359	
220	617485	9257878	4,080	0,408	
221	617285	9257614	0,740	0,074	
222	617397	9257614	0,964	0,096	
223	617737	9257172	0,629	0,063	
224	617913	9257012	0,712	0,071	
225	618201	9256690	3,590	0,359	
226	617205	9255920	1,230	0,123	
227	616631	9256031	5,970	0,597	
228	617514	9257344	0,830	0,083	07/08/2009
229	617435	9257325	0,603	0,060	
230	617410	9257451	0,652	0,065	
231	617340	9257525	4,750	0,475	
232	617293	9257622	0,734	0,073	
233	617398	9257686	0,832	0,083	
234	617461	9257618	1,336	0,134	
235	617535	9257545	0,572	0,057	
236	617624	9257488	1,910	0,191	
237	617664	9257608	4,000	0,400	
238	617798	9257602	8,130	0,813	
239	617840	9257493	2,260	0,226	
240	617903	9257365	2,090	0,209	
241	617945	9257263	3,531	0,353	
242	618003	9257405	7,500	0,750	
243	618030	9257536	2,830	0,283	
244	618046	9257663	2,520	0,252	
245	618038	9257863	5,400	0,540	

246	618201	9257945	1,110	0,111	07/08/2010
247	618218	9257842	8,400	0,840	
248	618326	9257929	8,590	0,859	
249	618144	9257454	12,890	1,289	
250	618262	9257449	2,490	0,249	
251	618393	9257459	8,260	0,826	
252	618996	9258135	3,240	0,324	
253	618964	9258407	2,150	0,215	
254	618883	9258259	1,378	0,138	
255	618702	9258214	8,510	0,851	
256	619053	9256228	13,510	1,351	
257	618950	9256138	0,143	0,014	
258	618872	9256148	44,900	4,490	
259	618855	9256032	1,350	0,135	
260	618682	9255860	8,530	0,853	
261	617821	9257078	2,660	0,266	
262	617842	9256908	6,390	0,639	
263	631484	9277177	14,230	1,423	
264	631337	9277284	14,400	1,440	
265	631130	9277352	0,729	0,073	
266	631093	9277059	1,854	0,185	
267	631124	9276779	1,874	0,187	
268	630995	9276704	2,470	0,247	
269	631543	9276554	9,060	0,906	
270	631647	9277068	0,716	0,072	
271	631827	9277076	6,260	0,626	
272	632264	9277219	16,690	1,669	
273	632026	9274898	5,790	0,579	
274	632464	9274731	14,410	1,441	
275	632330	9274735	13,790	1,379	
276	632042	9274681	0,788	0,078	
277	633364	9275686	0,800	0,080	
278	633665	9275422	2,590	0,259	
279	633832	9275490	1,980	0,198	
280	633752	9275270	5,870	0,587	
281	633894	9275203	7,710	0,771	
282	634074	9275140	8,650	0,865	
283	634042	9275363	5,720	0,572	
284	634346	9273906	3,060	0,306	
285	634048	9273914	4,190	0,419	
286	632239	9274093	5,690	0,569	
287	632576	9274287	9,460	0,946	
288	633201	9274455	43,200	4,320	
289	633247	9274793	7,800	0,780	

290	633658	9274900	3,380	0,338
291	634172	9275022	4,910	0,491
292	631164	9273744	2,020	0,202
293	631230	9273876	0,800	0,080
294	630828	9273478	1,157	0,116
295	630922	9273422	4,100	0,410
296	630730	9273302	4,770	0,477
297	630896	9273241	1,369	0,137
298	632089	9273179	0,568	0,057
299	632069	9273370	0,758	0,076
300	632940	9272955	1,990	0,199
301	633027	9272941	1,315	0,132
302	633654	9272630	1,614	0,161
303	633329	9272128	14,700	1,470
304	633435	9272082	4,580	0,458
305	633871	9271850	1,362	0,136
<hr/>				
306	620147	9261936	68,300	6,830
307	620125	9261752	5,380	0,538
308	620082	9261625	28,720	2,872
309	619982	9261343	51,920	5,192
310	619358	9261365	5,560	0,556
311	618544	9261618	0,750	0,075
312	618219	9261561	71,200	7,120
313	617306	9261366	37,060	3,706
314	616636	9261363	40,360	4,036
315	615823	9260777	2,960	0,296
316	614879	9260538	101,800	10,180
317	615278	9261191	5,990	0,599
318	615870	9261408	1,120	0,112
319	616364	9262146	33,250	3,325
320	616532	9262327	28,590	2,859
321	616673	9262411	36,050	3,605
322	616605	9262584	25,560	2,556
323	616980	9262476	62,000	6,200
324	617240	9262606	56,240	5,624
325	617873	9262849	78,800	7,880

02/08/2015

Fuente: Elaboración propia.

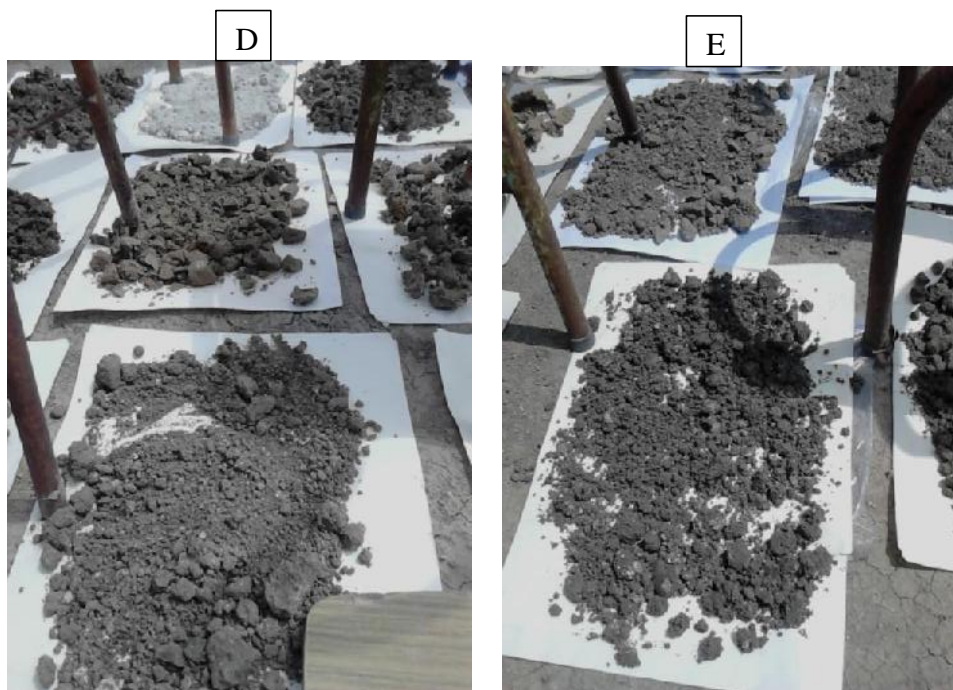


#### **4.5.1.2. Procedimiento para medir la conductividad eléctrica en el laboratorio a partir de las muestras de suelo extraídas de las parcelas de cultivos de arroz.**

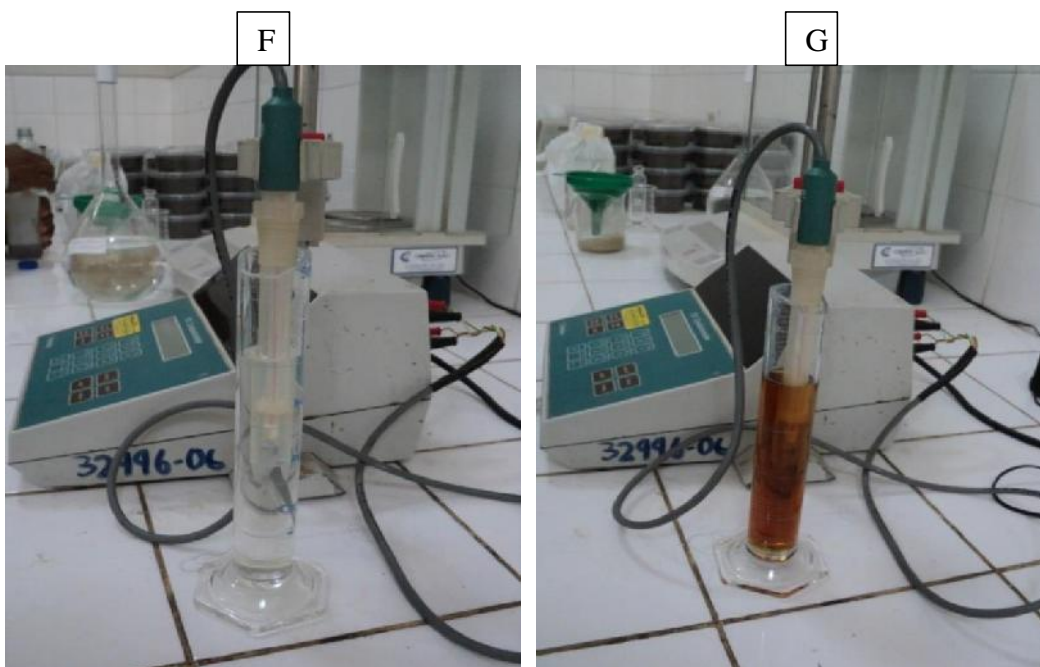
Para medir la conductividad eléctrica (CE) del suelo en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la UNPRG, el personal especializado realizó el siguiente procedimiento:

1. Secado: Las muestras son secadas a la intemperie durante cinco días, según el grado de humedad de la muestra Figura 4.9. D y E.
2. Una vez secada las muestras, son trituradas manualmente con ayuda de un mortero hasta obtener un resultado homogéneo, listo para realizar el tamizado.
3. Tamizado. Todas las muestras se hacen pasar a través de un tamiz de 10 mm de malla, con la finalidad de separar material como piedras, tallos, raíces, etc.
4. Cada una de las muestras se depositan en un recipiente de plástico, debidamente etiquetados.
5. En el laboratorio de suelos se utiliza la técnica de 1:1, esto es a 500 gr. de muestra de suelo le corresponde 500 ml de agua destilada [21]. Los dos componentes se mezclan en un vaso de precipitados y se agita hasta obtener una pasta homogénea, fondo de la Figura 4.10 F y G.
6. Se deja en reposo el menor tiempo posible, 3 horas, luego se filtra con ayuda de un papel de filtro a otro vaso de precipitado, el cual será vertido a una probeta graduada donde se utilizara el conductímetro *“712 conductometer”*.
7. Calibración del conductímetro: Antes de proceder a la medida de la conductividad eléctrica del extracto del suelo, el conductímetro se calibra con una solución de cloruro de potasio.

8. Finalmente a una temperatura de 25 °C se mide la CE de la solución filtrada de la muestra del suelo con el conductímetro electrónico de clase 712 *conductometer* Figura 4.10. F y G.



**Figura 4. 9.** Secado a la intemperie de las muestras extraídas del área de estudio en un ambiente del Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque. Fuente: Creación propia.



**Figura 4. 10.** Medida de la CE en una solución electrolítica obtenida mediante la relación 1:1 de las muestra de suelo, la diferencia en el color de las muestra F y G, se debe al color de la muestra. Fuente: Creación propia.

#### 4.5.1.3. Modelo numérico para obtener en forma aproximada la cantidad de carga eléctrica del suelo en cada una de las muestras obtenidas.

Pizarro en el año de 1985 obtuvo la CE del suelo expresada en dS/m a 25°C, multiplicada por 640, el cual es un valor aproximado a la concentración de Iones presentes en cada muestra de suelo ( $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ) calculada en ppm.

$$CE(640) = \sum_{i=0}^n Iones \quad (4.11)$$

Como parte de las observaciones del jurado evaluador, en la Tabla 4.9, se muestran los valores aproximados de la cantidad de carga eléctrica para cada una de las muestras de conductividad eléctrica del suelo presentadas en la tabla 4.8.

Relaciones de las unidades del SI adaptadas por *Soil Science Society of America* [20]

$$1 \text{ mol} = (\text{masa de un compuesto})/(\text{masa molar de un compuesto})$$

$$1\text{kg/m}^3 = 1000 \text{ ppm}, \quad 1\text{L} = 10^{-3} \text{ m}^3$$

**Tabla 4. 9.**

*Obtención de la cantidad de carga eléctrica aproximada, de cada una de las muestras de suelo,*

CE (dS/m)	# Iones	q= (# Iones). e  (C)
0,99	634	1,02E-16
1,53	979	1,57E-16
2,39	1526	2,45E-16
0,28	182	2,91E-17
0,81	516	8,28E-17
2,84	1814	2,91E-16
0,32	193	3,09E-17
0,37	235	3,76E-17
6,40	4096	6,56E-16

---

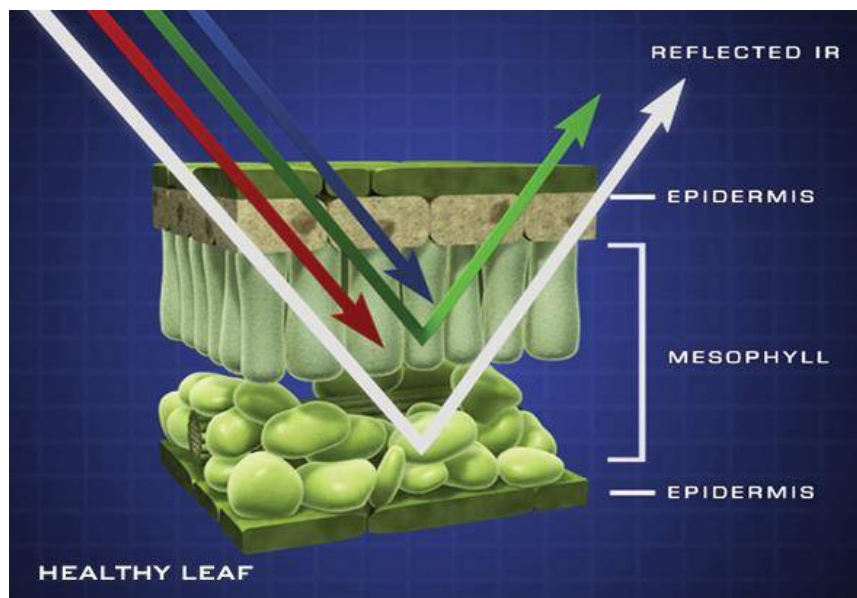
6,76	4323	6,93E-16
0,68	432	6,92E-17
4,27	2730	4,37E-16
4,21	2694	4,32E-16
3,91	2502	4,01E-16
4,69	2998	4,81E-16
4,32	2761	4,43E-16
6,14	3929	6,30E-16
3,80	2428	3,89E-16
5,36	3427	5,49E-16
7,54	4822	7,73E-16
4,66	2982	4,78E-16
2,98	1904	3,05E-16
4,36	2787	4,47E-16
5,02	3213	5,15E-16
6,98	4464	7,15E-16
4,97	3177	5,09E-16
3,64	2329	3,73E-16
5,89	3766	6,04E-16
7,28	4659	7,47E-16
7,00	4477	7,17E-16
5,64	3610	5,79E-16
5,07	3242	5,20E-16
1,86	1187	1,90E-16
2,44	1558	2,50E-16
2,05	1312	2,10E-16
1,74	1110	1,78E-16
3,09	1974	3,16E-16
3,46	2211	3,54E-16
2,04	1306	2,09E-16
0,74	472	7,56E-17
1,76	1126	1,81E-16
1,15	733	1,17E-16
1,75	1117	1,79E-16
1,32	842	1,35E-16
1,01	643	1,03E-16
3,07	1962	3,14E-16
1,23	784	1,26E-16
5,97	3821	6,12E-16

---

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.6. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)**

El índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) es una versión más sofisticada, que intenta reducir los efectos de atenuación atmosférica, diferencias de iluminación, sombras de nubes, variaciones topográficas presentes en múltiples bandas [12]. Es ampliamente utilizado para mejorar la discriminación de las cubiertas vegetal, evalúa el vigor de las plantas directamente relacionadas con la capacidad fotosintética y la absorción o reflexión de la energía. Está basado en la relación entre las longitudes de onda rojas (longitud de onda central de 0,560  $\mu\text{m}$ ) y casi infrarrojas (longitud de onda central de 0,835  $\mu\text{m}$ ), la clorofila absorbe gran parte del espectro visible (Rojo) y las estructuras de las plantas (Epidermis) por el gran contenido de moléculas de agua que estas presentan reflejan fuertemente las ondas casi-infrarrojas [12]. El NDVI es un indicador importante para el estudio de áreas con cultivos de arroz, debido a que los cultivos de arroz se desarrollan mediante inundación de agua controlada, por lo tanto las plantas contienen un alto contenido de agua y sufren evapotranspiración durante el día. Esto hace que la absorción en la banda del infrarrojo cercano (longitud de onda central de 0,835  $\mu\text{m}$ ) disminuya totalmente y aumente la absorción en el espectro visible (Rojo, longitud de onda central 0,560  $\mu\text{m}$ ) [15]. Todo el proceso desarrollado para el cultivo de arroz hace que el NDVI sea un índice de mucha importancia en el espacio y tiempo. Este índice no mide directamente la productividad ni la disponibilidad de biomasa en áreas de cultivo, pero si tiene una relación con el contenido de materia inorgánica del subsuelo donde se encuentra el cultivo, el daño que pueda originar la acumulación de sales (materia inorgánica) en el subsuelo (zona de raíz del cultivo de arroz) se manifiesta directamente en el vigor de la planta y este afecta directamente el NDVI.



**Figura 4. 11.** Modelo de absorción y reflexión del espectro visible e infrarrojo cercano respectivamente, en el interior de una hoja saludable, esto se debe a las condiciones óptimas (suelo bajo en sales, bajo estrés hídrico) de producción que presenta una planta, el alto contenido de moléculas de agua presente en los cloroplastos en el interior de las células mesófilas especializadas para la fotosíntesis [15] [6], refleja fuertemente las ondas en el infrarrojo cercano (0,835  $\mu\text{m}$ ).

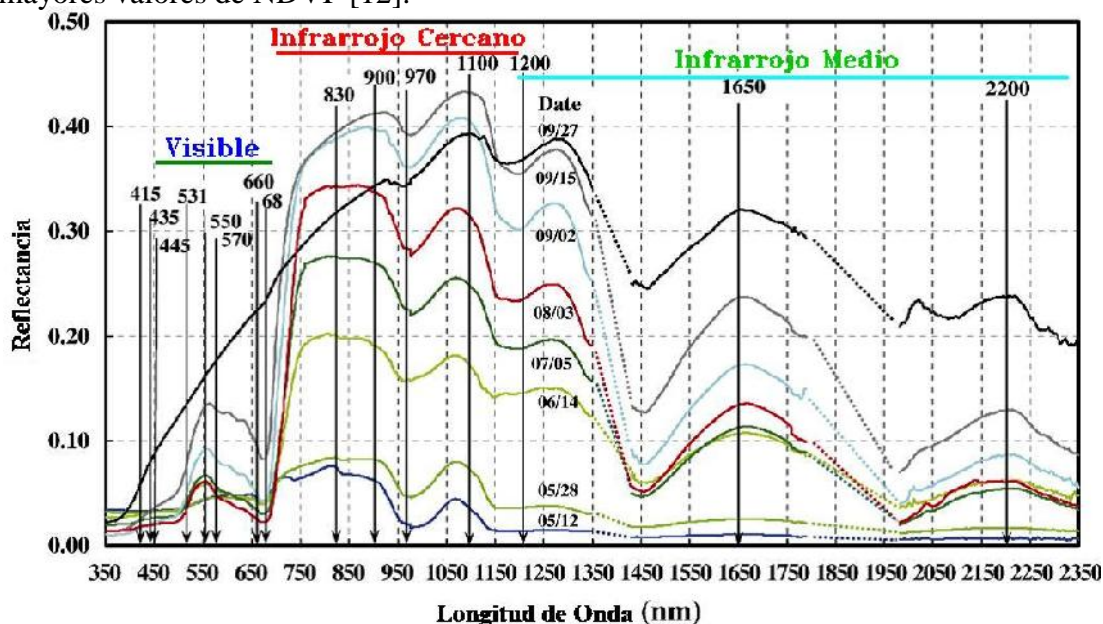
Fuente: Adaptado de: <http://arset.gsfc.nasa.gov>. [Acceso 13/01/2019]

La Figura 4.12, presenta la respuesta espectral que tiene un cultivo de arroz en muy buen estado, muestra un claro contraste entre el espectro del visible e infrarrojo cercano. Para construir el NDVI se utiliza la banda roja (entre 0,631 - 0,692  $\mu\text{m}$ ), y el infrarrojo cercano (entre 0,772 - 0,898  $\mu\text{m}$ ), la banda roja e infrarroja cercana, presentan condiciones físicas muy diferentes al momento de interactuar con la estructura interna de las hojas en las plantas, como se muestra en la Figura 4.11, se construye el NDVI, por la proximidad espectral que presentan, se calcula mediante la siguiente ecuación [12].

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (4.11)$$

Donde  $\rho_{NIR}$ : es la reflectividad en el infrarrojo cercano y  $\rho_R$ : es la reflectividad en el rojo, se empleó un programa en IDL con nombre de archivo “*NDVI\_TM\_ETM.PRO*” que se encuentra en el Anexo E.

Los valores del NDVI varían entre -1 y 1, estos resultados se deben a los valores de reflectancia espectral que se encuentran en un rango de 0 - 1. El agua tiene reflectancia mayor en la banda roja que en el infrarrojo cercano, por lo tanto el NDVI tiene valores negativos, las nubes tienen un NDVI negativo próximos a cero, el suelo desnudo y con poca vegetación tiene valores positivos no muy altos. Para los fines de este trabajo de investigación donde se trabaja con áreas de cultivo de arroz, se considera los valores menores a 0,4 NDVI, a los suelos cuasi desnudos sin cultivo de arroz. La vegetación muy densa (Cultivo de arroz), húmeda y bien desarrollada presenta los mayores valores de NDVI [12].



**Figura 4. 12.** Cambio estacional del espectro de reflectancia de un cultivo de arroz con diferente Índice de Área Foliar (LAI) y una Gruesa Productividad Primaria (GPP) medido usando un espectro radiómetro. Fuente: Adaptado de Inoue et al., 2008 y Sahoo et al., 2015.

El NDVI, se obtiene de la reflectancia espectral de las bandas 3 y 4 de los sensores TM y ETM+ con una resolución espacial de cada pixel de 30 m x 30 m, para el caso del sensor MODIS a partir

de la reflectancia de las bandas 1 y 2 rojo e infrarrojo cercano respectivamente con una resolución espacial de 250 m x 250 m en cada pixel.

#### **4.7. Desviación estándar de imágenes satelitales**

La desviación estándar muestra la variabilidad de un conjunto de datos, indicado por medio de valores numéricos, si los valores de la variable estudiada están muy lejos del promedio. Cuanto mayor sea este valor, mayor será la variabilidad de aquella variable (NDVI) estudiada, dentro del área de estudio. De esta manera se puede saber si todos las áreas que conforman un grupo de pixeles en la imagen satelital son idénticos o varían mucho entre ellos, los cultivos de arroz generan una alta variabilidad en la cobertura del suelo durante todos los años, la desviación estándar de imágenes satelitales del sensor ETM+, ayuda a localizar aquellas áreas de máxima variabilidad donde se instalan cultivos de arroz, mediante la ecuación 4.12.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.12)$$

#### **4.8. Máximo Valor Compuesto de 25 imágenes (ETM+) de NDVI periodo 2001 a 2014**

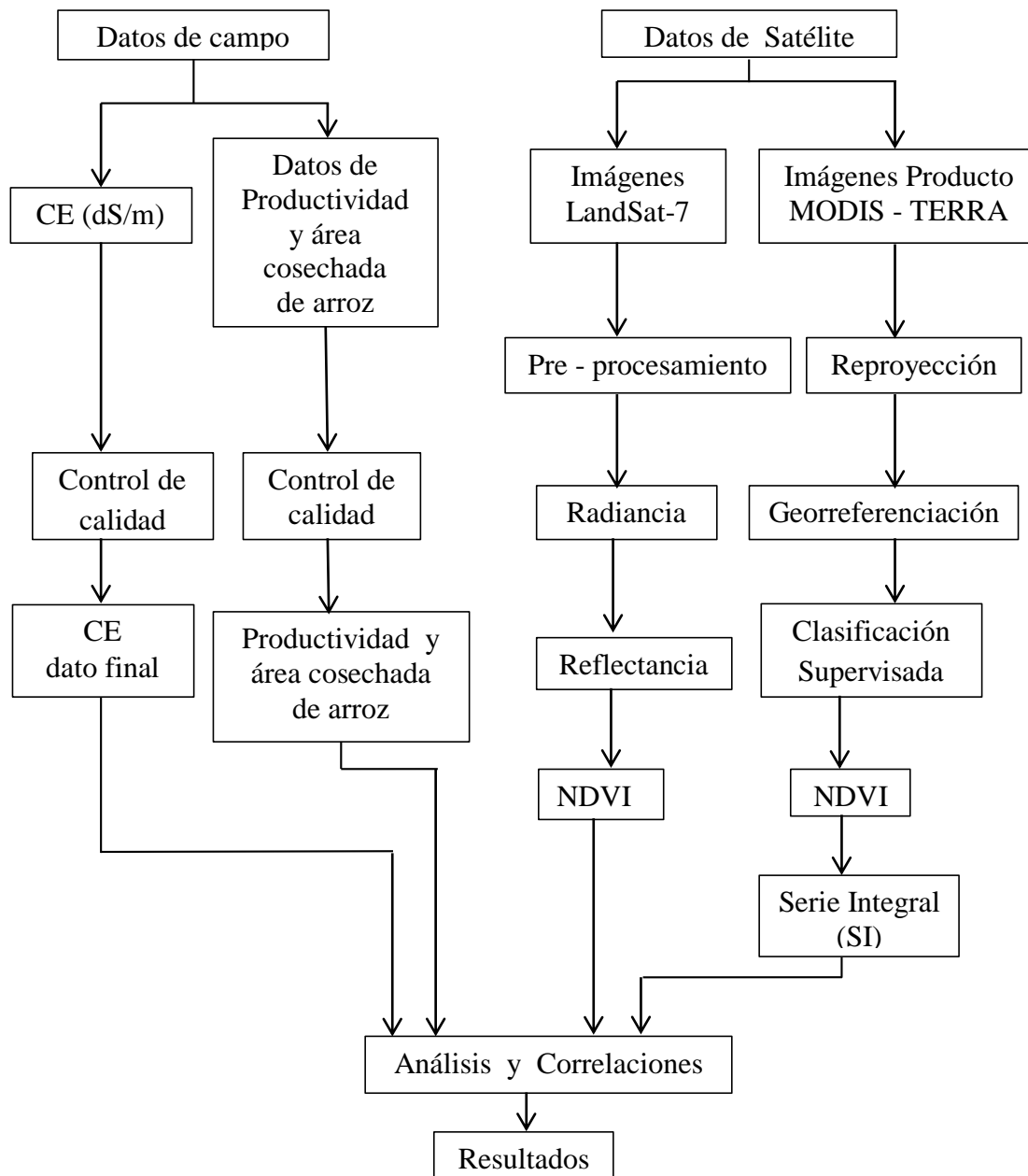
El Máximo Valor Compuesto (MVC) y Mínimo Valor Compuesto (MVC) es una técnica que se aplica a todos los pixeles en una misma posición para cada una de las imágenes en el tiempo, esta técnica se desarrolló mediante un programa implementado en el software de programación IDL. El proceso que desarrolla el programa es el siguiente: En una serie de imágenes (apilado) se analiza el primer pixel en la misma posición para todas las imágenes apiladas y elige el pixel con mayor valor digital, el cual formará parte de una nueva imagen de máximo compuesto o mínimo compuesto, al finalizar el procedimiento se obtiene una nueva imagen de máximo o mínimo valor compuesto, como se muestra en la Figura A del Anexo A. [2]



El Máximo Valor Compuesto (MVC) de NDVI se utilizó para evaluar la dinámica anual de tierras cultivadas y no cultivadas durante el periodo 2001 - 2014. Mediante esta metodología permite identificar aquellas áreas con cultivos de arroz y no cultivadas.

#### 4.9. Metodología

Este trabajo siguió el procedimiento mostrado en la Figura 4.13:



**Figura 4.13.** Metodología del presente trabajo de investigación. Fuente: Elaboración propia.

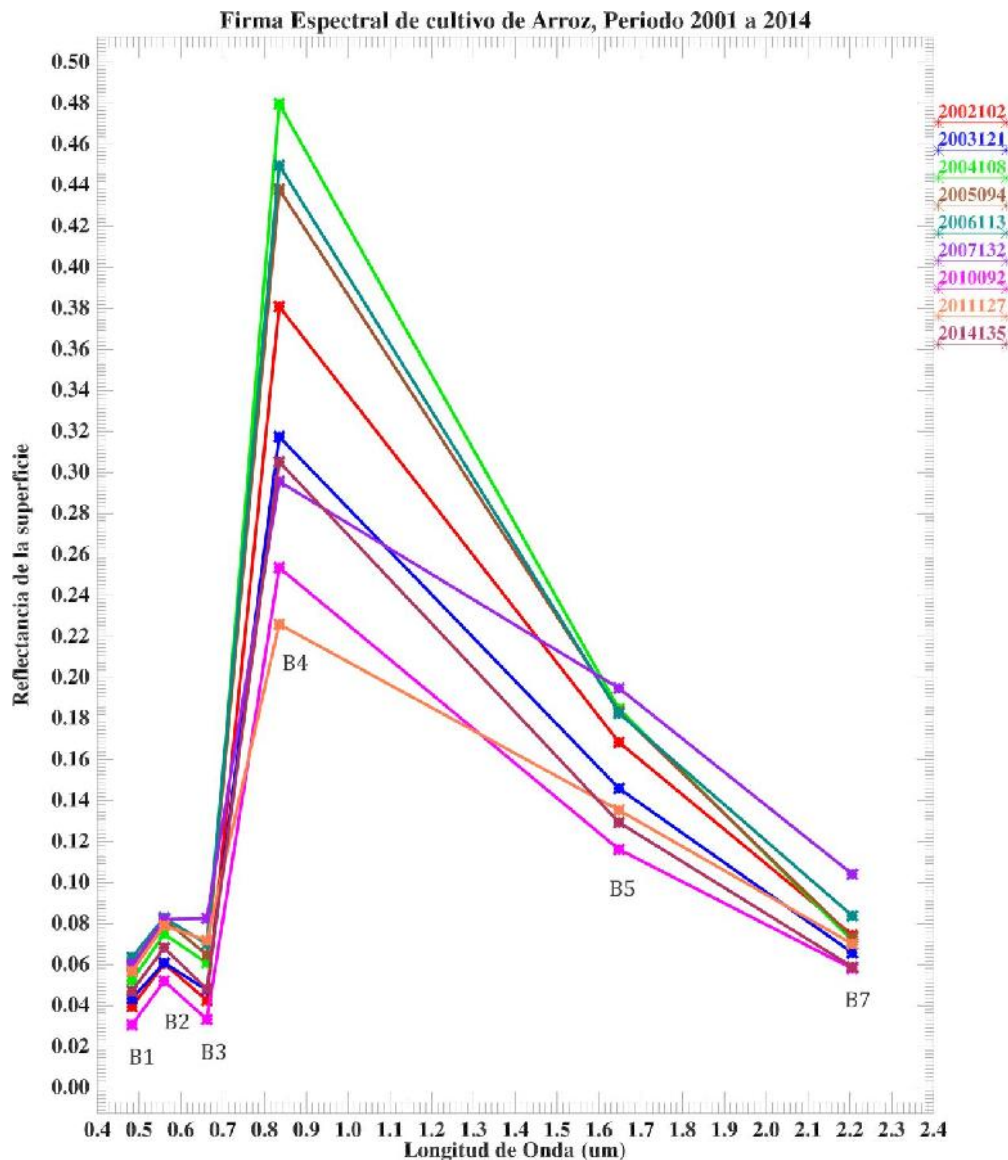
## V. Resultados y discusiones

### 5.1. Firma espectral de cultivos de arroz en diferentes estados de salud

Las estructuras internas de la epidermis en las plantas, absorben gran parte de la radiación solar incidente del espectro visible, un cultivo en muy buen estado de salud, solo refleja el 4 % de la totalidad de radiación incidente (azul - banda 1 del sensor ETM+) azul, con una longitud de onda central de 0,483  $\mu\text{m}$ . En el espectro visible, el color verde es reflejado en un 6 % de la radiación incidente (verde – banda 2 del sensor ETM+), con una longitud de onda central de 0,560  $\mu\text{m}$ . El color rojo es reflejado en un porcentaje cuasi mayor que el azul aproximadamente 4,5% de la radiación incidente (rojo – banda 3 del sensor ETM+), con una longitud de onda central 0,662  $\mu\text{m}$ . El color verde del espectro visible, en las plantas presenta la mayor reflectancia, esto explica el color verde apreciado por nuestros ojos, además es importante remarcar que la máxima emitancia espectral del sol según la ley de Wien, se produce entorno a los 0,480  $\mu\text{m}$ . El Infrarrojo Cercano correspondiente a la banda 4 del sensor ETM+, con una longitud de onda central de 0,835  $\mu\text{m}$ . En un cultivo de arroz, en muy buen estado de salud, refleja fuertemente la radiación incidente, debido a la estructura que presentan los pigmentos de las hojas, que tienen un comportamiento transparente frente a dicha radiación, se refleja en un porcentaje mayor al 50 % (Figura 5.2, firma espectral de color verde), en las bandas 5 (1,648  $\mu\text{m}$ ) y 7 (2,206  $\mu\text{m}$ ) la reflectancia disminuye esto debido a la presencia de moléculas de agua en los pigmentos de las hojas, el agua absorbe en un porcentaje muy alto la radiación incidente en la región espectral del infrarrojo medio [9].

Por esta razón, un cultivo de arroz en muy buen estado de salud, ofrece una baja reflectividad en las bandas azul y rojo, con un ligero aumento en la banda verde del espectro visible. En el infrarrojo cercano presenta una fuerte reflectividad, cuando un cultivo de arroz presenta un muy buen estado de salud, mayor será el contraste entre los valores de reflectancia

captados por las bandas del sensor. Cuando los valores de reflectancia espectral disminuyen en el infrarrojo cercano (banda 4) y aumentan en el espectro visible (bandas B1, B2, B3), indica que el cultivo de arroz se encuentra en mal estado de salud (Figura 5.1, Firma espectral de color naranja), también se puede indicar, que a bajos valores de reflectividad en las bandas 5 y 7, el cultivo no presenta estrés hídrico. [15].



**Figura 5. 1.** Firma espectral del cultivo de arroz con coordenadas UTM (E=618495,0 m – N= 9268225,0 m) obtenidas para el periodo 2001 - 2014. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.2, se muestran las firmas espectrales de diferentes cultivos de arroz, obtenidas en una misma fecha (12 de Abril del 2002), a partir de imágenes de reflectancia espectral del sensor ETM+ a bordo del satélite LandSat-7. Las firmas espectrales pertenecen a cultivos de arroz, con un tiempo de producción, aproximadamente cinco meses, al instante de la obtención de las muestras, en las imágenes satelitales, los cultivos se encuentran en la etapa de inicio del llenado del grano, por lo cual, la planta presenta un pico máximo de vigor vegetal. Los cultivos en esta etapa de producción, son sensibles a la falta de agua suficiente para que la planta sufra de estrés hídrico, lo cual afecta severamente el rendimiento del cultivo, presentando una disminución en la producción [15].

La información de cada muestra obtenida se encuentra la Tabla 5 del anexo B, en la Figura 5.2 se puede observar las firmas espectrales de un cultivo de arroz, en colores verde y marrón. La firma espectral de color verde, presenta una mayor absorción de la radiación electromagnética incidente en el espectro visible (B1, B2, B3), frente a la firma espectral de color marrón que presenta una absorción ligeramente menor en esta región del espectro electromagnético (0,452 - 0,692  $\mu\text{m}$ ). La firma espectral de color verde, presenta una fuerte reflectancia en el infrarrojo cercano (banda B4), y se presenta una baja reflectancia en la misma banda de la firma espectral de color marrón. Esta diferencia, indica que el cultivo de arroz representado por la firma espectral de color verde se encuentra en mejor estado de salud que el cultivo representado por la firma espectral de color marrón. La diferencia del estado de salud en cada cultivo, está relacionado a la calidad del suelo y agua tal como se muestra el comportamiento espectral de la Figura 5.2 [15].



**Figura 5. 2.** Firma espectral en cultivos de arroz en diferentes puntos de la Intercuenca Chancay Lambayeque. Las muestras obtenidas pertenecen a la fecha 12 de abril del 2002.

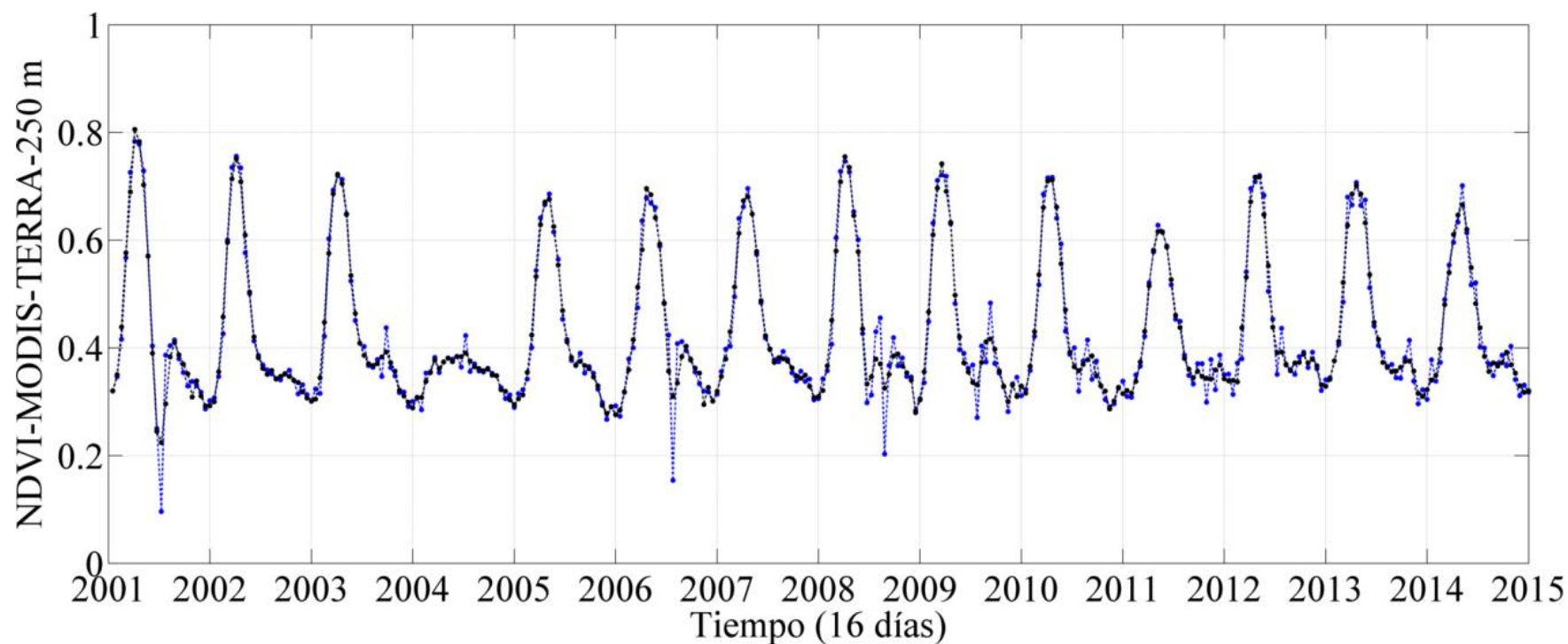
Fuente: Elaboración propia.

## **5.2. Análisis de datos NDVI de imágenes MODIS**

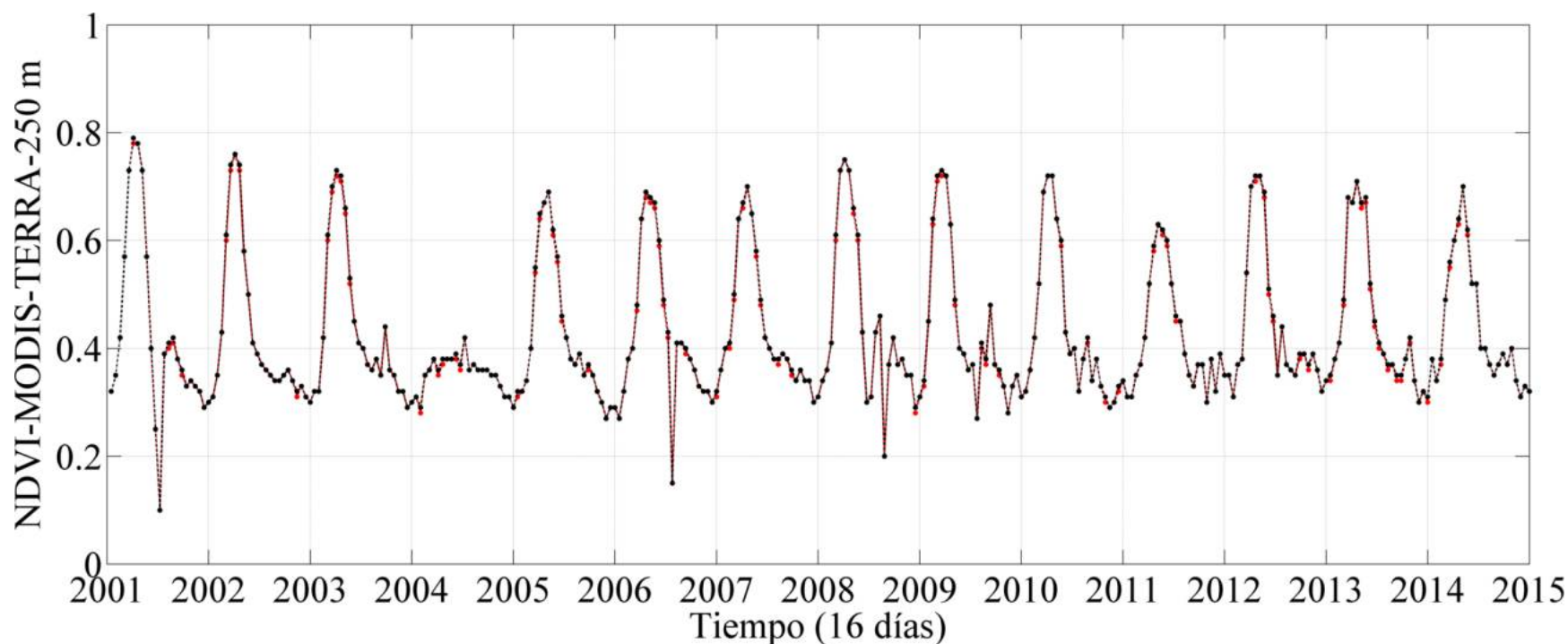
Para obtener áreas de cultivos de arroz, se tiene que realizar un análisis en series de tiempo del NDVI. Las imágenes del sensor MODIS son una buena alternativa gracias a su alta resolución temporal, las imágenes de NDVI del sensor MODIS, son productos de máximo valor compuesto de 16 días.

### 5.2.1. Limpieza de datos NDVI del sensor MODIS

Para realizar una limpieza de los datos de NDVI, se preparó un archivo compilado de 322 imágenes en formato BIL, el cual fue procesado y corregido a través del segundo módulo “*Data cleaning*” del software *TimeStats*. En la Figura 5.3 se presenta la serie de tiempo de los valores del NDVI original, periodo 2001 - 2014 (línea de color negro), y la serie de tiempo del NDVI, suavizada mediante el filtro adaptativo de *Savitzky-Golay*, programa adaptado en el lenguaje de programación IDL, usa la función *SAVGOL* que retorna los coeficientes del filtro *Savitzky-Golay*, los cuales se pueden usar mediante la función *CONVOL*. El filtro de *Savitzky-Golay* utiliza un grado de polinomio igual a 2 y una longitud de ventana igual a 4 (línea de color azul), además de realizar el suavizado de la serie temporal del NDVI, el programa no mantiene la estacionalidad de aquellos policultivos instalados en las áreas de cultivo de arroz durante el periodo junio a diciembre, como se puede observar aquellos pequeños picos del NDVI en los años 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 y 2014. La Figura 5.4, presenta la serie temporal del NDVI suavizado, usando el filtro adaptativo de *Savitzky-Golay* incluido en el software *TimeStats* (línea color rojo). El filtro utiliza el grado de polinomio igual a 2 y una longitud de ventana igual a 4 [28], además de realizar el suavizado y la limpieza de los datos (datos outlier), también realiza una interpolación de aquellos valores perdidos, mediante el *método de la media global* incluido en el software. En la Figura 5.4, se puede observar una corrección mínima de la serie temporal del NDVI con respecto a la serie original (línea de color negro), la importancia radica en que se mantiene la estacionalidad de los cultivos de arroz, incluido la estacionalidad de los policultivos instalados al finalizar la producción de arroz en el mes de junio.



**Figura 5. 3.** Serie temporal de valores promedio de NDVI-MODIS-TERRA 250 m de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771, periodo 2001 - 2014. La línea de color negro corresponde a los valores de NDVI original, la línea de color azul corresponde a los valores de NDVI suavizado por el filtro adaptativo de *Savitzky-Golay*, programa adaptado en el lenguaje de programación IDL 8.3. Fuente: Elaboración propia.



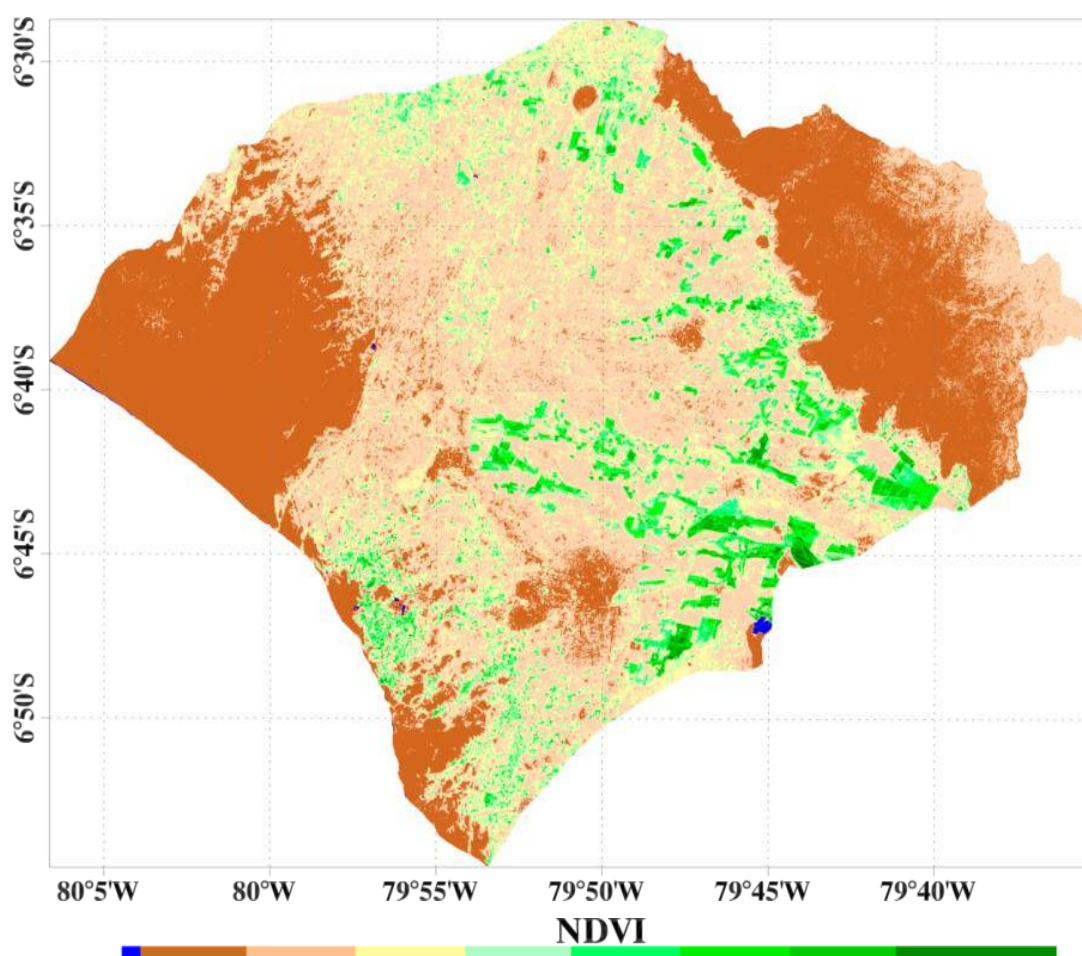
**Figura 5. 4.** Serie temporal de valores promedio de NDVI-MODIS-TERRA 250 m de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771, periodo 2001 - 2014. La línea de color negro corresponde a los valores de NDVI original, la línea de color rojo corresponde al NDVI suavizado por el filtro adaptativo de *Savitzky-Golay*, utilizando el software *TimeStats 1.0*.

Fuente: Elaboración propia.



### 5.3 Identificación de áreas adaptadas para el cultivo de arroz

Para identificar las áreas de cultivo de arroz, primero se detectó aquellas áreas cubiertas por vegetación durante todo el año, pertenecientes a pastizales, bosques y otros cultivos como caña de azúcar, etc. De tal manera que se pueda obtener un “*perímetro GIS*” de aquellas áreas verdes, para este procedimiento se utilizó una imagen del sensor ETM+ de fecha 18/10/2007, que coincide con la extracción de muestras de campo (datos de conductividad eléctrica del suelo).



**Figura 5. 5.** Distribución espacial de NDVI, de fecha 18/10/2007 del sensor ETM + a bordo del satélite Landsat-7, cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771.

Fuente: Elaboración propia.

NDVI: 0,29 – 1) en la fecha de extracción de muestras de suelo en el área de estudio, en aquella

fecha, las áreas de cultivos de arroz deben estar en preparación para iniciar la campaña de arroz 2008, por lo tanto, es un indicador que en estas áreas no se instalarán cultivos de arroz.

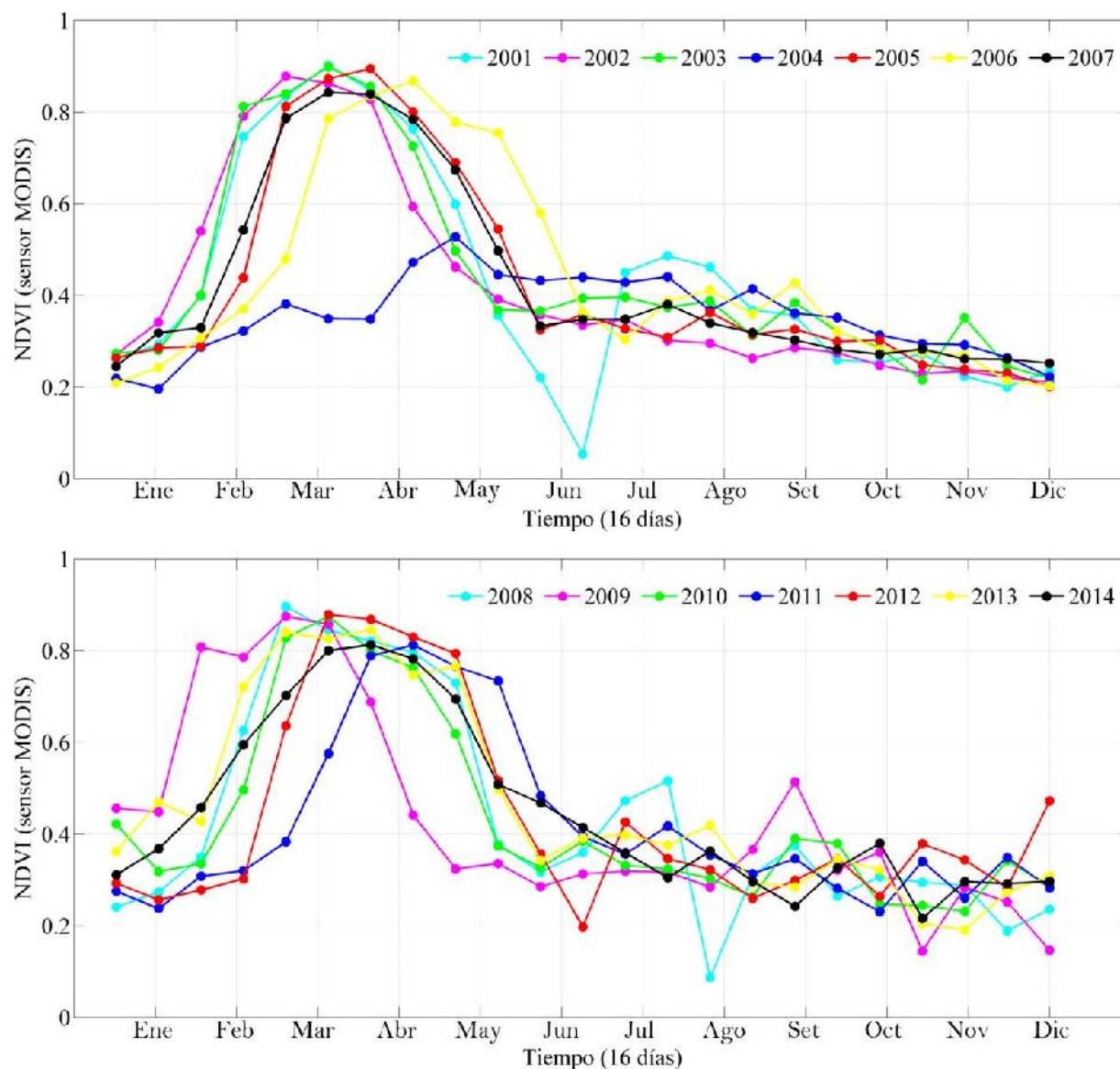
De la Figura 5.5 se obtiene un “*perímetro GIS*” de áreas verdes a partir de la variación del NDVI en el rango de 0,29 a 1, representando un área de 18 382,40 ha.

#### **5.4. Estacionalidad de cultivos de arroz en la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca**

##### **137771**

La estacionalidad de los cultivos de arroz se pueden detectar por el verdor de estos en un determinado ciclo, es importante detectar el inicio y el final de un cultivo de arroz en un área muy extensa (escala regional), la estacionalidad de los cultivos es muy importante en zonas de alta productividad, por un factor de sanidad agrícola, de esta manera se pueden eliminar ciertas enfermedades de las plantas que se pueden presentar. La sanidad está íntimamente relacionado a la rentabilidad de cualquier producto, se puede constatar un marcado desorden en la instalación de cultivos de arroz en otras regiones (San Martín, Amazonas, etc.), con ayuda de la teledetección se puede detectar la existencia simultánea de zonas en plena etapa de trasplante, macollamiento, iniciación y desarrollo de la panícula, y en algunos lugares incluso en etapa de llenado de grano y cosecha. Esta falta de homogeneidad en la instalación de cultivos de arroz provoca serios problemas sanitarios, ya que se dificulta el corte del ciclo biológico de las plagas y enfermedades, dando lugar a la aparición de enfermedades no comunes en dichas zonas. La disminución de estas enfermedades no comunes se logra teniendo una homogeneidad en la instalación del cultivo, influye el tipo de cultivo, calidad de suelo y agua, de esta manera se tendrá una marcada estacionalidad. En la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771, a partir del año 1990 se instauró una política agrícola que marca una etapa la producción de arroz, esto se debe a las condiciones climáticas de la zona [18]. La Figura 5.6 muestra la serie temporal anual del NDVI en

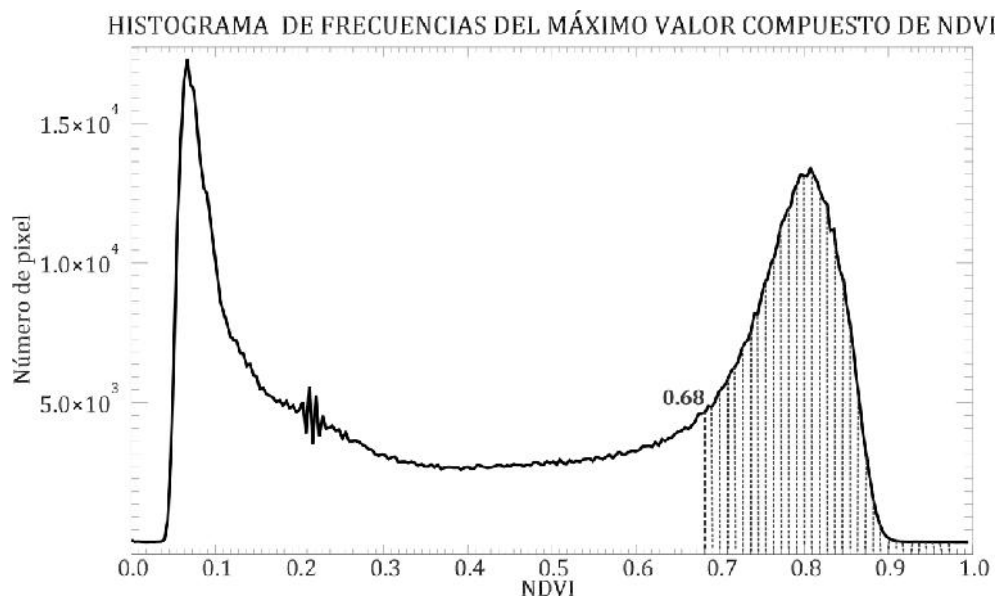
el Distrito de Pueblo Nuevo, donde se puede observar que el inicio de la producción de arroz está entre los meses de diciembre a enero, finalizando entre los meses de mayo a junio. La serie temporal del NDVI en el año 2004 disminuye notablemente, se debe a un evento de sequía regional ocurrido en la costa norte del Perú



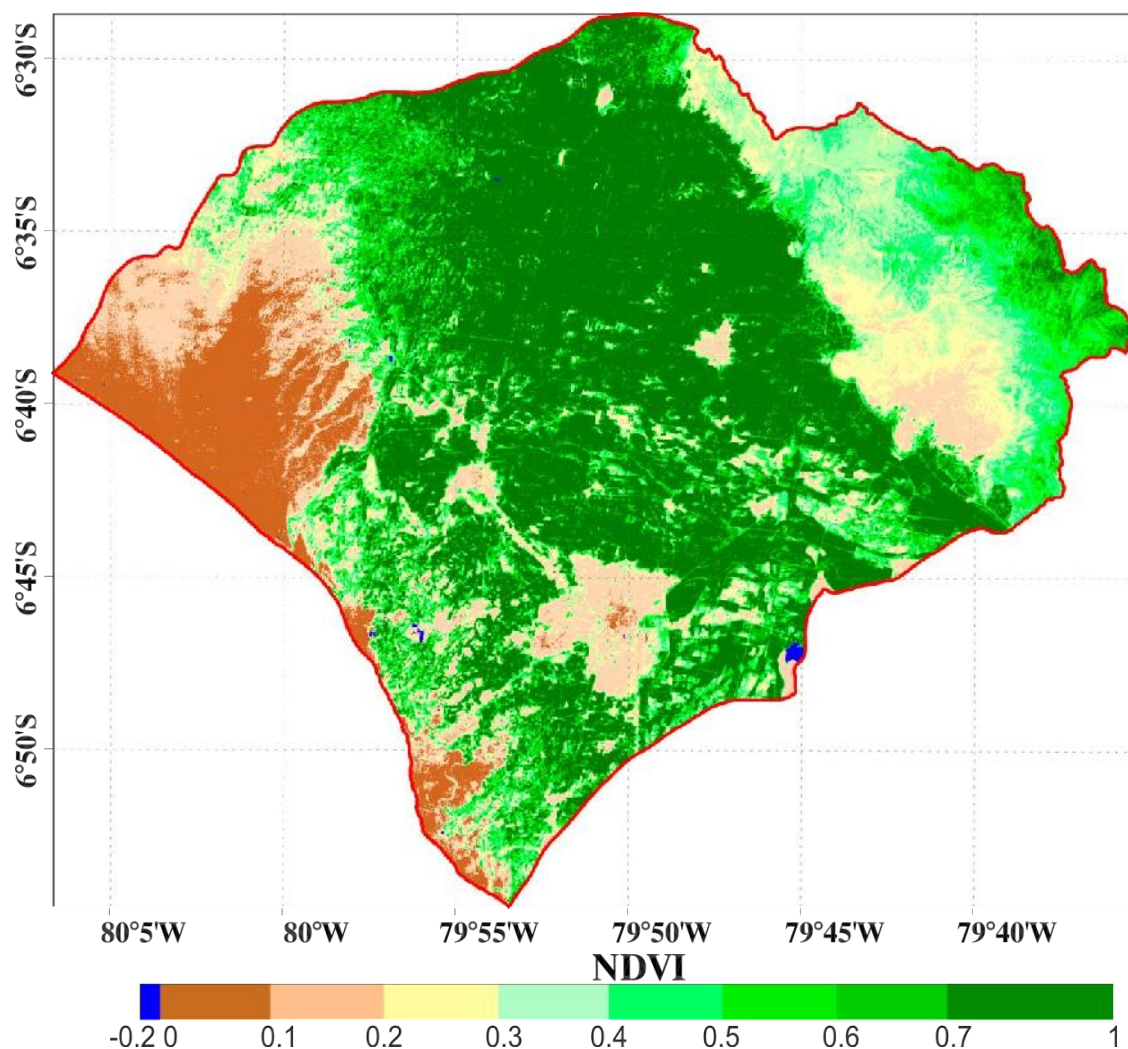
**Figura 5. 6.** Variación temporal del NDVI-MODIS-TERRA 250 m en cultivos de arroz pertenecientes al distrito de Pueblo Nuevo. Fuente: Elaboración propia.

### 5.5. Máximo Valor Compuesto de 25 imágenes de NDVI del sensor ETM+/LandSat-7 periodo 2001-2014 de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771

La metodología del Máximo Valor Compuesto (MVC) de NDVI se utilizó para evaluar la dinámica interanual de las áreas cultivadas con arroz y no cultivadas durante el periodo 2001 - 2014. Mediante esta metodología se identificó las áreas con cultivos de arroz y sin cultivos de arroz, durante todo este periodo. El objetivo principal es identificar las áreas donde se instalan cultivos de arroz en forma continua. En la Figura 5.8, se observa que los valores altos de NDVI en un rango de 0,68 -1, corresponden a cultivos de arroz, representando el 28,12% del área total, un aproximado de 40 831,02 ha, que corresponden a cultivos de arroz en diferente estado de salud. Los valores bajos de NDVI en el rango de 0 – 0,68, que representan el 71,80% del área total, un aproximado de 104 378,22 ha, que corresponden a otros cultivos, pastizales, cerros, caminos, ciudades y suelos en descansó. El 0,08 % del área total, en un rango de NDVI de -1 a 0, corresponden a cuerpos de agua, un aproximado de 109,98 ha, pertenecientes al reservorio Boro y posas de oxidación en los distritos de Pomalca y San José respectivamente.



**Figura 5. 7.** Histograma de frecuencia de la imagen de Máximo Valor Compuesto, generada a partir de 25 imágenes de NDVI del sensor ETM+, periodo 2001 – 2014. Fuente: Elaboración propia.



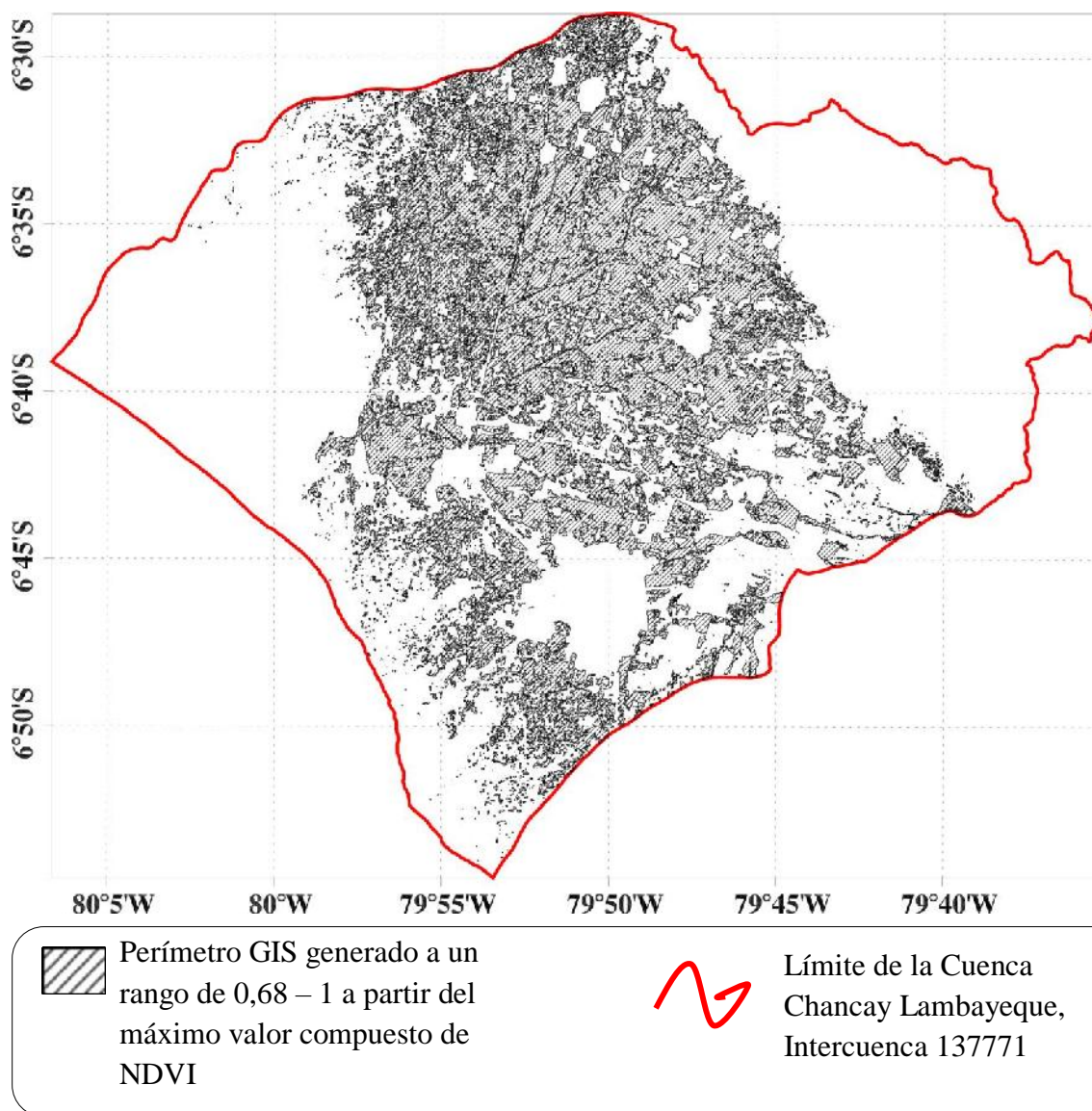
**Figura 5. 8.** Distribución espacial del Máximo Valor Compuesto de NDVI del sensor ETM+ de LandSat-7, periodo 2001-2014 de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771. Se utilizó 25 imágenes de NDVI. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5.7, representa el histograma de frecuencia de la imagen de Máximo Valor Compuesto de NDVI generado a partir de la Figura 5.8. La gráfica describe una distribución bimodal, la primera modal correspondiente a los valores 0,0 - 0,29, representa los suelos sin vegetación. El rango de valores de 0,29 - 0,68 corresponden a suelos con vegetación pertenecientes a bosques, pastizales y fincas, etc. La segunda modal comprendida entre los valores de 0,68 - 1



corresponde a los suelos donde se instalan cultivos de arroz debido a la intensidad con que se presentan los valores de NDVI en estas áreas.

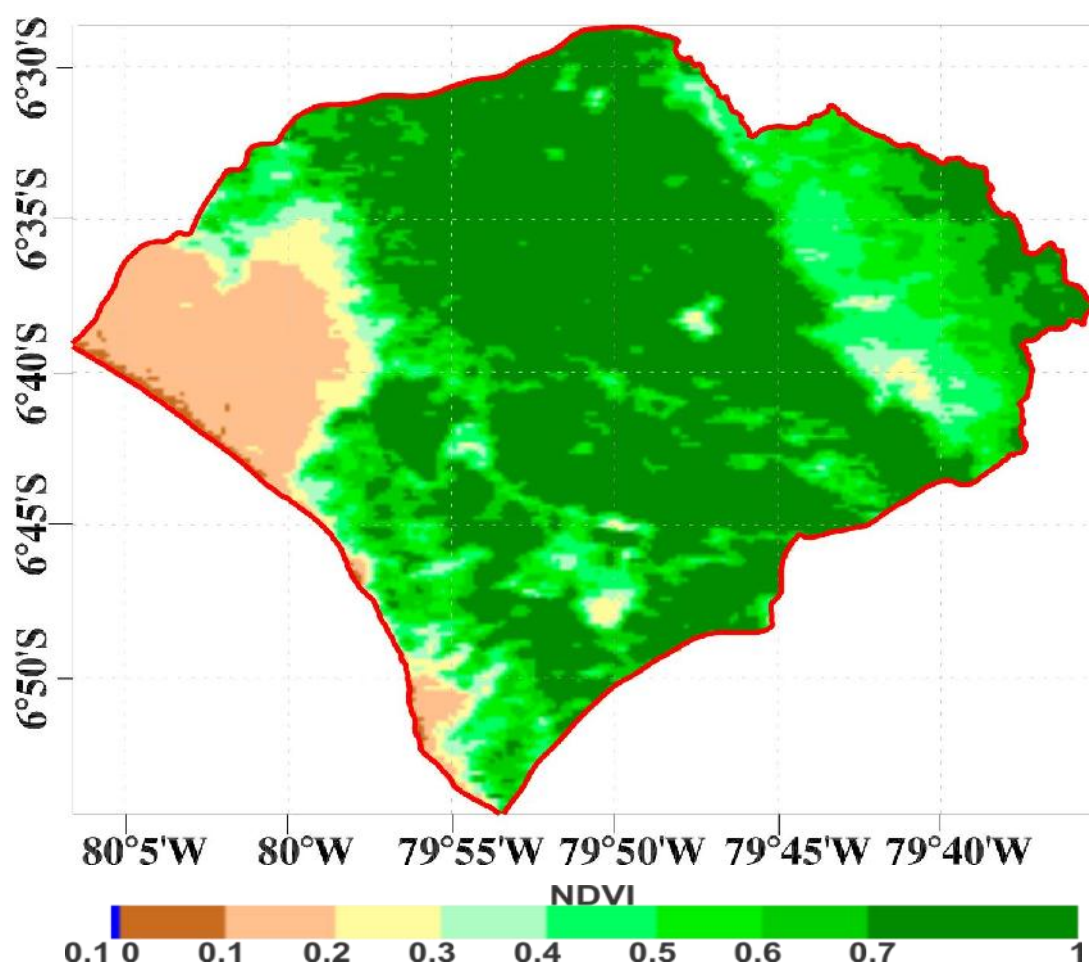
En la Figura 5.9, se muestra el perímetro GIS generado a partir de la Figura 5.7 y 5.8 a un rango de 0,68 - 1, este perímetro GIS engloba todas las áreas donde se instalan cultivos de arroz.



**Figura 5. 9.** Perímetro GIS generado a un rango de 0,68 – 1 del Máximo Valor Compuesto de NDVI, periodo 2001 - 2014. Áreas de cultivos de arroz. Fuente: Elaboración propia.

### 5.5.1. Máximo Valor Compuesto de NDVI del sensor MODIS periodo 2001-2014 de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771

El máximo Valor Compuesto (MVC) de 322 imágenes de NDVI del sensor MODIS Figura 5.10, contrasta con la distribución espacial del MVC de 25 imágenes del sensor ETM+ Figura 5.8. La resolución espacial de un pixel, en una imagen del sensor MODIS, es de  $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ , no es recomendable hacer un análisis visual o espacial, más bien sirve para un análisis temporal de la variabilidad del NDVI en la superficie del suelo. Las imágenes de alta resolución espacial del sensor ETM+ permitieron obtener los perímetros *GIS* de los cultivos de arroz, los cuales se aplicaron a las imágenes de NDVI del sensor MODIS, lo que ayudó a verificar la estacionalidad de los cultivos de arroz en la serie temporal del NDVI.



**Figura 5. 10.** Distribución espacial del Máximo Valor Compuesto de NDVI del sensor MODIS-TERRA 250m periodo 2001 a 2014 de la Cuenca Chancay Lambayeque, Intercuenca 137771. Fuente: Elaboración propia.

### **5.5.2. Dinámica interanual de los cultivos de arroz mediante el NDVI, en el periodo 2001- 2014**

Mediante una distribución espacial del NDVI de imágenes del sensor MODIS en el tiempo Figura 5.11, se observa la dinámica interanual de los cultivos de arroz instalados en la cuenca Chancay Lambayeque, Intercuenca 137771, en un rango de 0,68 - 1 del NDVI, durante el periodo 2001 – 2014. Esto sirve para tener una idea general de la dinámica de los cultivos de arroz (en aquellas áreas donde siempre se instalan cultivos de arroz), los valores más bajos del NDVI entre 0 – 0,68, para diferentes fechas, muestran aquella áreas donde no se instalan cultivos de arroz.

Mediante este análisis se puede observar dos anomalías muy bien marcadas en la dinámica del NDVI, correspondiente a los años 2004 y 2011, producto de la sequía regional producida en toda la costa norte del Perú. Este evento se ha estado presentando durante muchos años en la costa norte, ocasionando pérdidas económicas considerables en la agricultura, En la Tabla 5.1 se presenta las cifras de sequía extrema presentados en la costa norte del Perú.

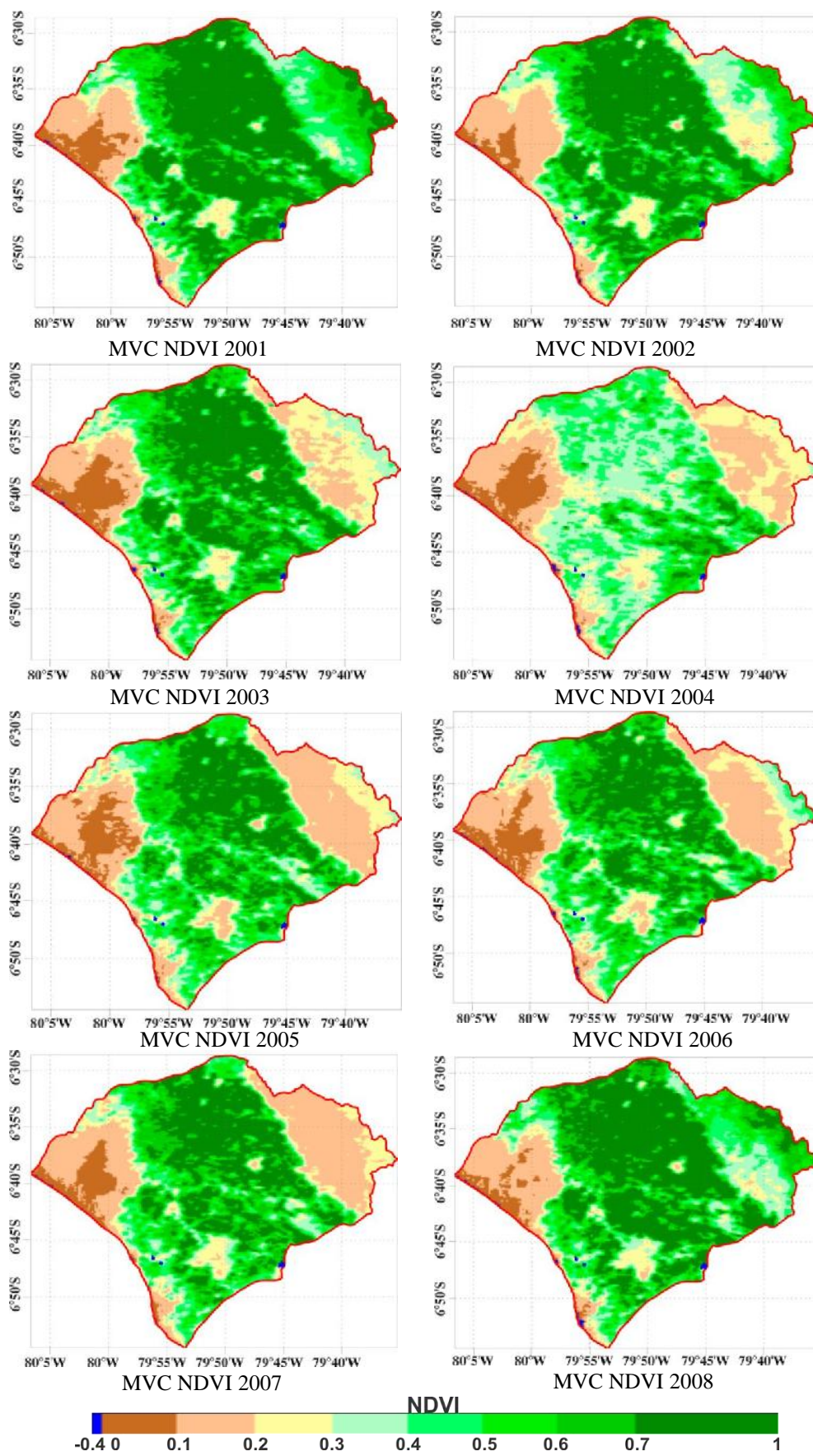
**Tabla 5. 1.**

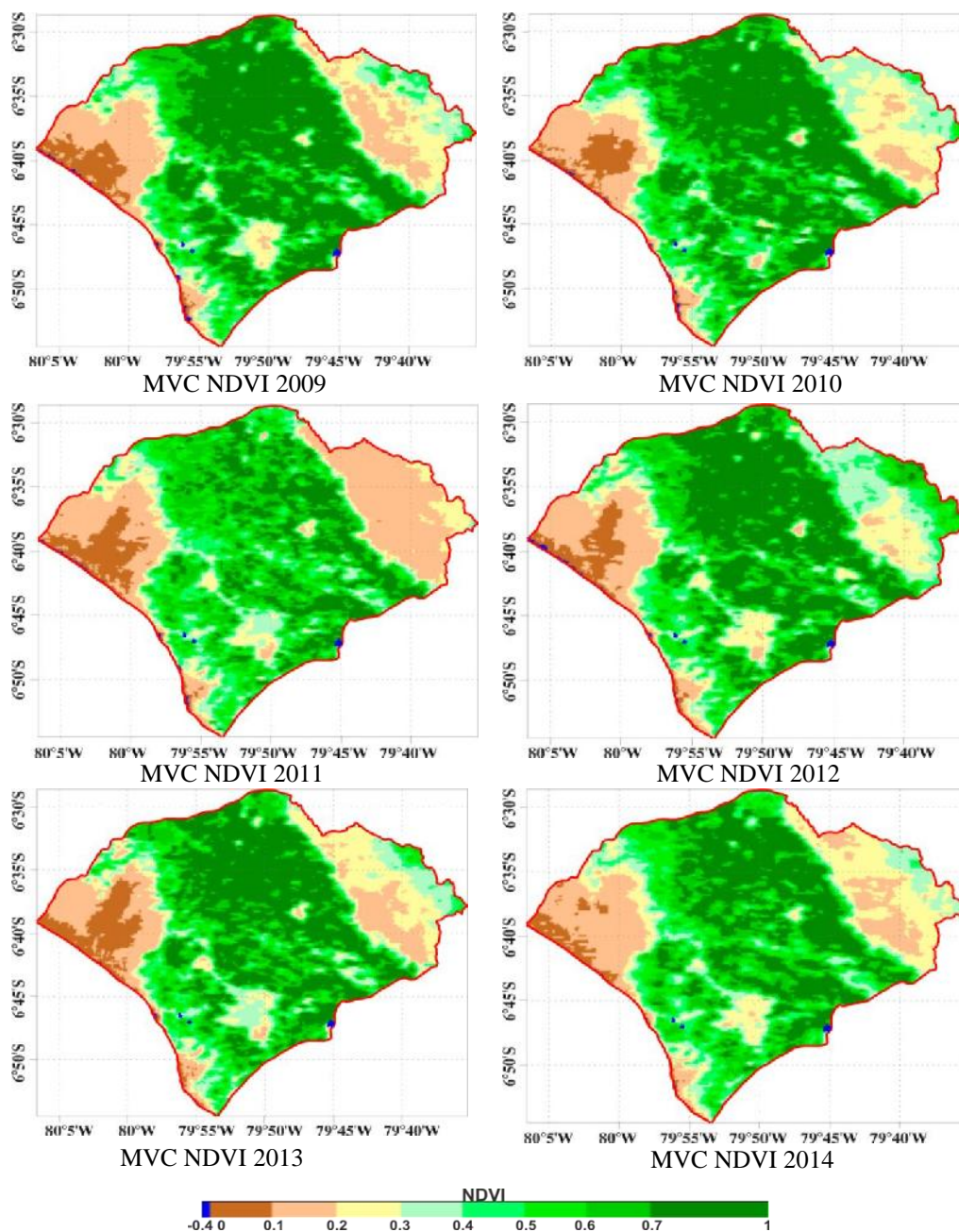
*Cifras de cultivos de arroz frente a problemas de sequias en la cuenca Chancay Lambayeque.*

Estación de irrigación	Descarga del río Chancay (millones m <sup>3</sup> )	Total de áreas irrigadas (ha)	Áreas cultivadas con arroz (ha)
1979-1980	375	39 271,0	1 802,0
1985-1986	892	74 515,0	1 738,0
1990-1991	944	72 658,0	10 276,0
2003-2004	553	54 586,0	10 571,0

Fuente: Data del PEOT y junta de usuarios Chancay-Lambayeque [32].





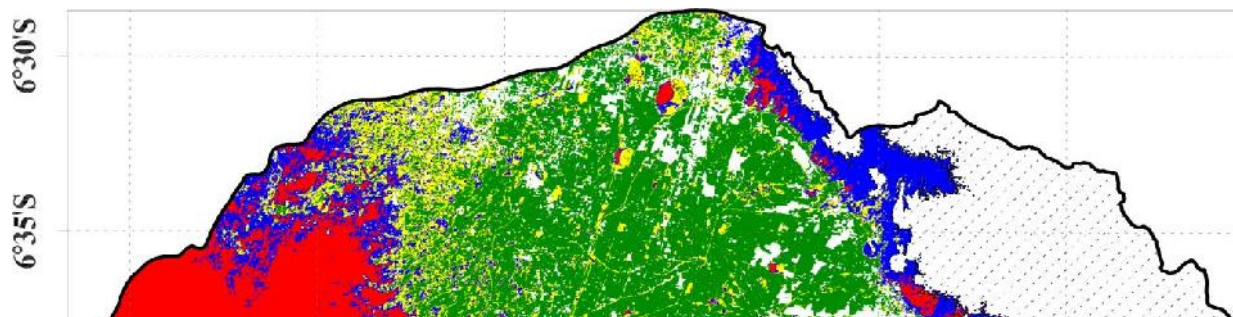


**Figura 5. 11.** Serie temporal de la distribución espacial del Máximo Valor Compuesto anual de NDVI, periodo 2001 a 2014 en la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771, sensor MODIS a bordo del satélite TERRA. Fuente: Elaboración propia.

#### **5.6. Análisis de la variabilidad espacial del NDVI representado en la desviación estándar para el periodo 2001 a 2014**

La Figura 5.12 muestra la variabilidad espacial del NDVI para el periodo 2001 - 2014 representado mediante la desviación estándar. La desviación estándar indica la variabilidad de una

muestra aleatoria, representado por un conjunto de valores, si los valores de la variable están muy alejados del valor promedio. Cuanto mayor sean estos valores numéricos, mayor será la variabilidad (el cambio en la superficie es más intenso respecto a la variable analizada), y cuanto menor sean, más cerca al promedio, menor será la variabilidad o cambio producido en la superficie del suelo. De esta manera se puede saber si todos los valores son similares o varían mucho entre ellos dentro de un área determinada. Según la Figura 5.9 las áreas de color rojo muestran una nula variabilidad en valores de NDVI ( $0,0 - 0,043$ ), corresponden a ciudades, caminos, suelos con alto contenido de sales próximos al Océano y dunas, aproximadamente 22,43 % (un aproximado de 32 577,84 ha). En azul ( $0,043 - 0,097$ ) se muestran áreas con baja variabilidad del NDVI que corresponden a áreas arboladas muy dispersas, aproximadamente 11,73 % (un aproximado de 17 046,18 ha). En amarillo ( $0,097 - 0,150$ ) se muestra una región de moderada variación del NDVI, que corresponden principalmente algarrobales, pastizales y fincas, aproximadamente 10,14 % (un aproximado de 14 727,78 ha). Son notables las áreas en color verde que muestra una muy alta variabilidad ( $0,150 - 0,35$ ) del NDVI, aproximadamente el 29,06 % (un aproximado de 42 218,82 ha) correspondientes a suelos con cultivos de arroz, además refleja muy bien la variación estacional del cultivo de arroz mostrada en la Figura 5.15. Los valores de la variabilidad del NDVI de imágenes MODIS pertenecientes a cultivos de arroz se presentan en color verde. En la Figura 5.18 se presenta la variabilidad del NDVI en los cerros pertenecientes a pastos desarrollados en épocas de lluvia, el cual contrasta con los valores de precipitación Figura 5.19.



**Figura 5. 12.** Mapa de la desviación estándar del NDVI para el periodo 2001 - 2014. Los valores en rojo indican que no existe gran variabilidad de la cobertura del suelo correspondiente a las áreas próximas al Océano Pacífico, ciudades y suelos con alto contenido de sales. Los valores en color verde indican que existió una gran variabilidad en la superficie del suelo, correspondiente a zonas de cultivos de arroz. La superficie marcada (punteada) corresponde a los cerros, con una altura entre 75 - 826 m.s.n.m. aproximadamente. Las áreas en blanco corresponden a otros cultivos y no son tomadas en cuenta en este estudio. Se utilizó 25 imágenes clasificadas del NDVI del sensor ETM+ a bordo del Satélite artificial LandSat-7.

Fuente: Elaboración propia.

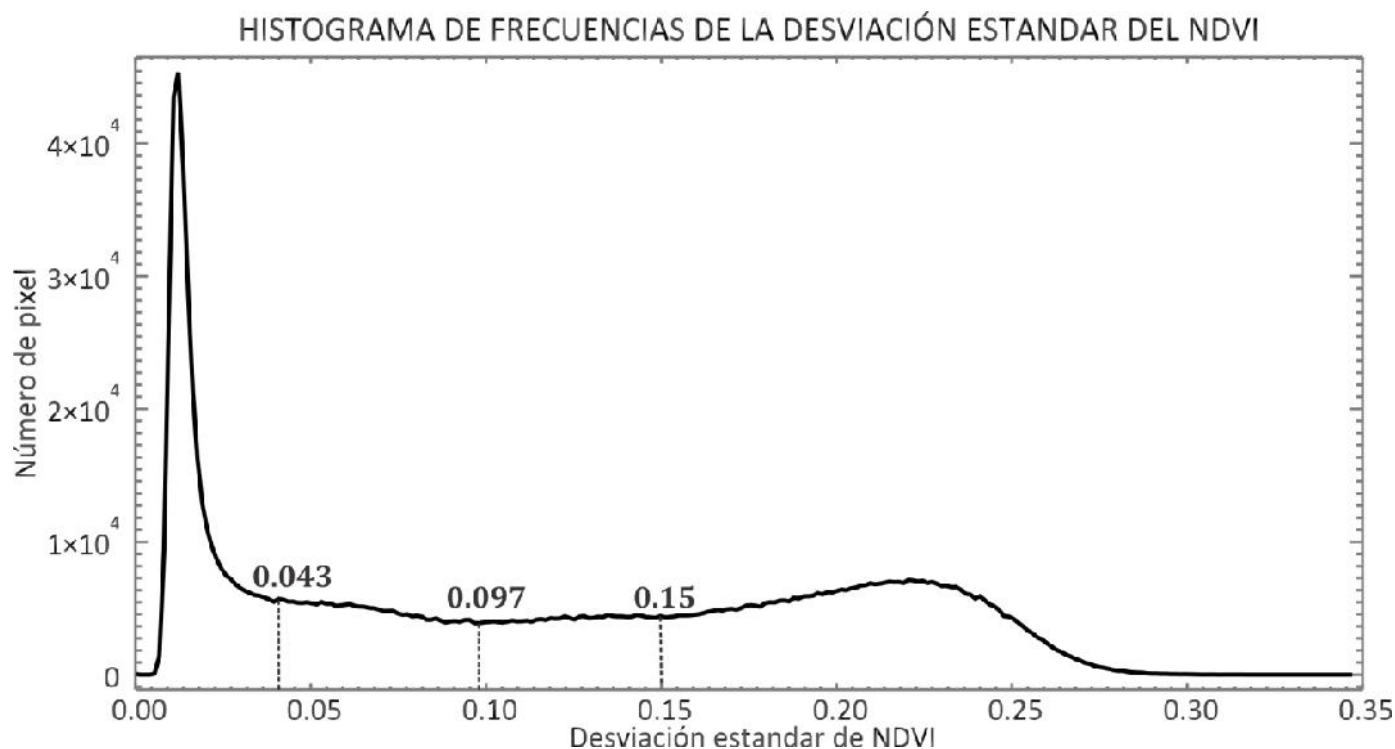
de fecha 20/11/2007, corresponde aproximadamente 12,66 % del área total (un aproximado de 18

382,40 ha). La clase cerros analizada entre las elevaciones de 75 - 826 msnm, corresponden aproximadamente 13,90 % del área total (un aproximado de 20 196,24 ha). El reservorio Boro en el distrito de Pomalca y las pozas de oxidación en el distrito de San José corresponden aproximadamente 0,08 % del área total (un aproximado de 109,98 ha).

**Figura 5. 13.** Perímetro GIS generado a un rango de 0,15 - 0,35 a partir los valores de desviación estándar, Figura 5.12.

Fuente: Elaboración propia.





**Figura 5. 14.** Histograma de frecuencia de la imagen de desviación estándar, generada a partir de 25 imágenes de NDVI del sensor ETM+, periodo 2001 – 2014.

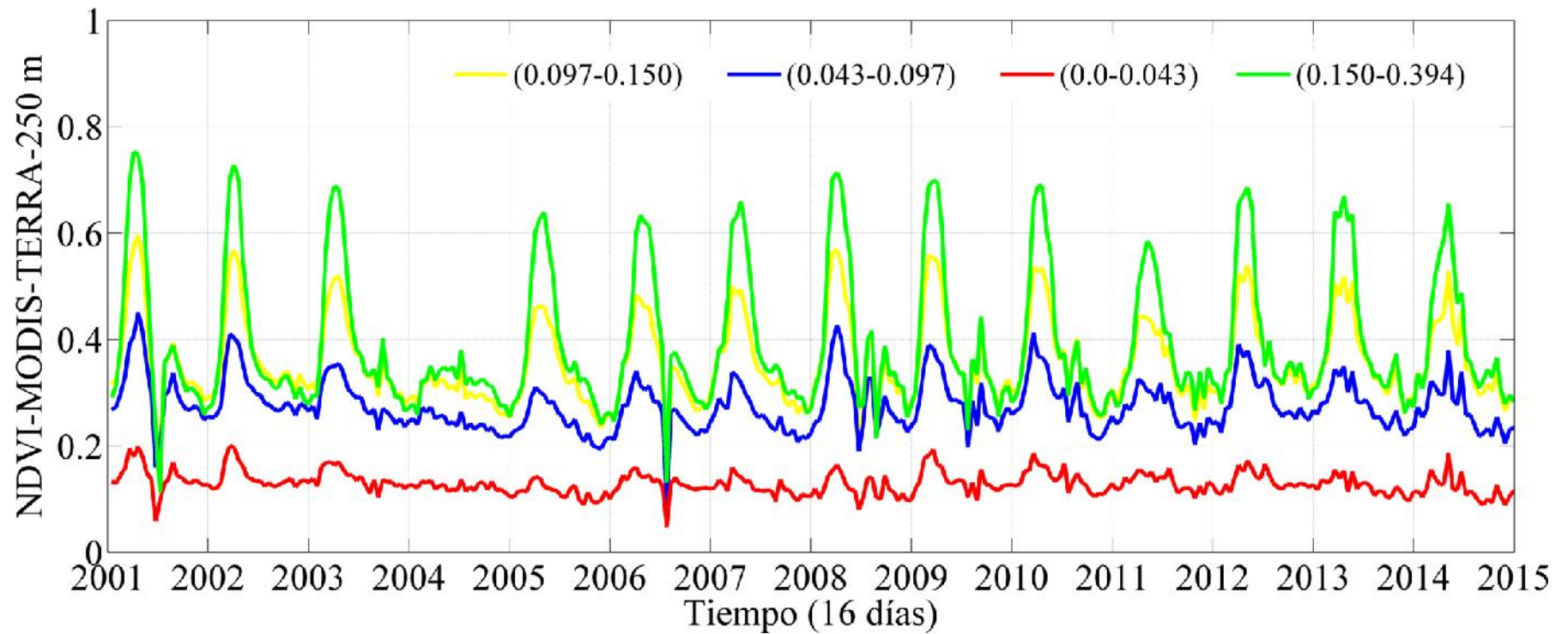
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.13, se muestra el perímetro GIS generado a partir de la Figura 5.12 en el rango de 0,15 - 0,35 de desviación estándar del NDVI, este perímetro engloba a todas las áreas donde se siembran cultivos de arroz, esta actividad genera un cambio en la superficie del suelo en todos los años, y es detectado por el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI).

En la Figura 5.14, se muestra el histograma de frecuencia de la imagen presentada en la Figura 5.12, describe una distribución bimodal. La primera modal, comprendida entre los valores 0,0 - 0,05, representa a los suelos con una muy baja variabilidad sobre su superficie (suelos sin vegetación), representado por las áreas de color rojo en la Figura 5.12. La segunda modal, comprendida entre los valores 0,15 - 0,35, representa a aquellos suelos que han sufrido cambios

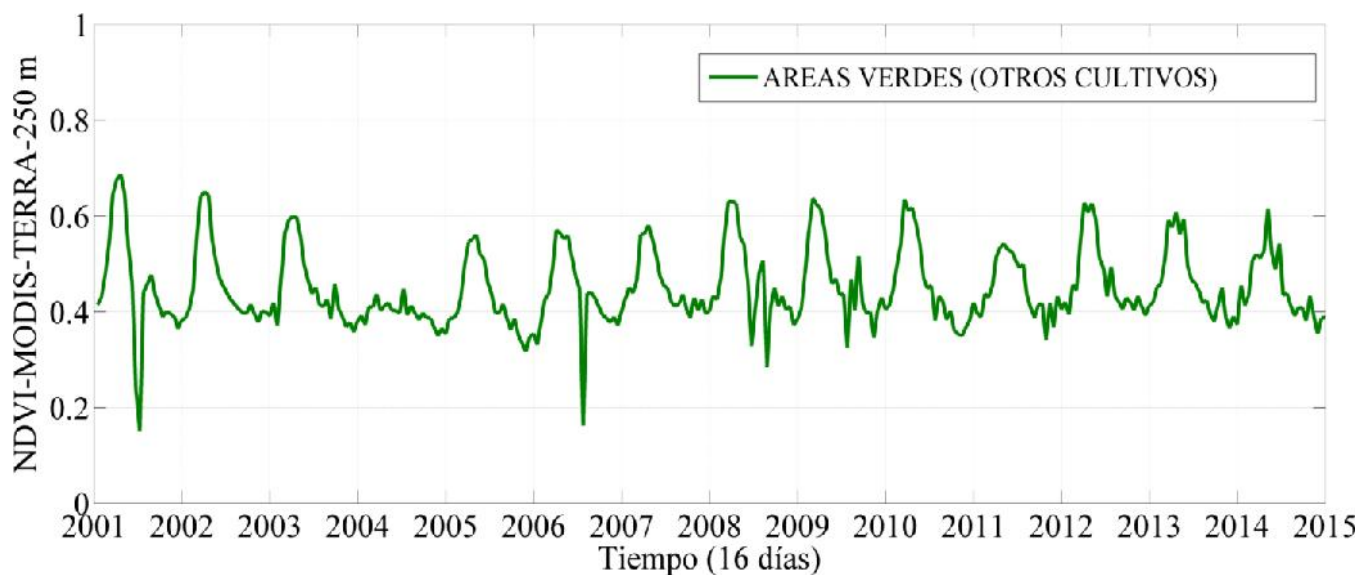
en su superficie en forma continua (superficies con alta variabilidad). En la Figura 5.12, se presentan mediante las áreas de color verde, pertenecientes a cultivos de arroz.

La serie temporal de datos promedio de NDVI Figura 5.15, nos muestra la existencia de cultivos de arroz dentro del área de color verde. En la Figura 5.12, la cual confirma su alta variabilidad mediante la desviación estándar, y la estacionalidad de la serie temporal de NDVI. Se obtuvo un “*Perímetro GIS*” para cada clase de la Figura 5.12, y se aplicó al conjunto de imágenes de NDVI del sensor MODIS, y se obtuvo la serie temporal promedio de NDVI para cada clase. En la Figura 5.15 presentado en color verde, se muestra la variación temporal de NDVI del cultivo de arroz, con valores promedio entre 0,0 - 0,8 NDVI. En color amarillo se muestra la serie temporal de NDVI de otros cultivos y o áreas verdes próximas a los cultivos de arroz, mantienen la estacionalidad debido a la humedad que los cultivos de arroz proporcionan a estas áreas, los valores promedio de NDVI disminuyen muy por debajo de la clase arroz (verde), entre los valores 0,0 – 0,6 NDVI en todas las estaciones. Esto demuestra que dichas áreas verdes si pertenecen a cultivos de arroz o que siempre se instalan cultivos de arroz en dichas áreas presentadas en color verde de la Figura 5.12. En color azul se muestra la serie temporal de NDVI de zonas arboladas, los valores promedio de NDVI alcanzan los valores entre 0,0 – 0,4 NDVI. En color rojo se muestra la serie de tiempo de NDVI en ciudades y suelos desnudos sin presencia de vegetación.



**Figura 5. 15.** Serie temporal de datos promedio de NDVI cada 16 días, datos obtenidos del sensor MODIS TERRA 250 m. La serie temporal del NDVI se obtuvo a partir de los “Perímetros GIS” de cada una de las clases, representadas en la Figura 5.12 mediante la desviación estándar, obtenida de 25 imágenes de NDVI del sensor ETM+ (resolución espacial de 30 m x 30 m), periodo 2001 - 2014. Fuente: Elaboración propia.

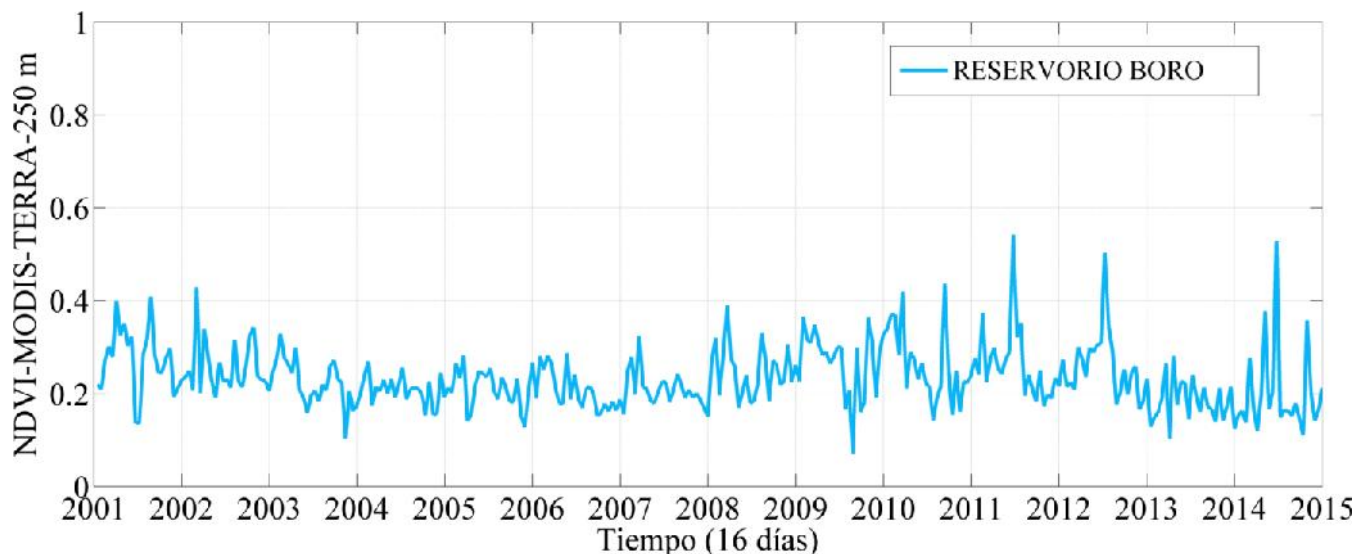




**Figura 5. 16.** Serie de tiempo promedio de NDVI del sensor MODIS, obtenida a partir de los “Perímetro GIS” perteneciente a las áreas en color blanco (clase de otros cultivos) de la Figura 5.9, periodo 2001 - 2014. El “Perímetros GIS” de estas áreas se obtuvo en un rango de 0,29 – 1,0 NDVI, representada en la Figura 5.5. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.16, se muestra la serie temporal promedio de NDVI perteneciente a otros cultivos presentados en la Figura 5.5. Dichas áreas fueron obtenidas a partir del rango 0,29 – 1 de NDVI en la imagen del sensor ETM+ de fecha 18/10/2007 Figura 5.5, tiempo donde no existía ningún cultivo de arroz en el área de estudio. Los promedios de NDVI no superan el valor 0,6, quiere decir que existen otros cultivos como caña de azúcar, si fuese cultivos de arroz los valores promedio de NDVI alcanzarían el valor 0,7.

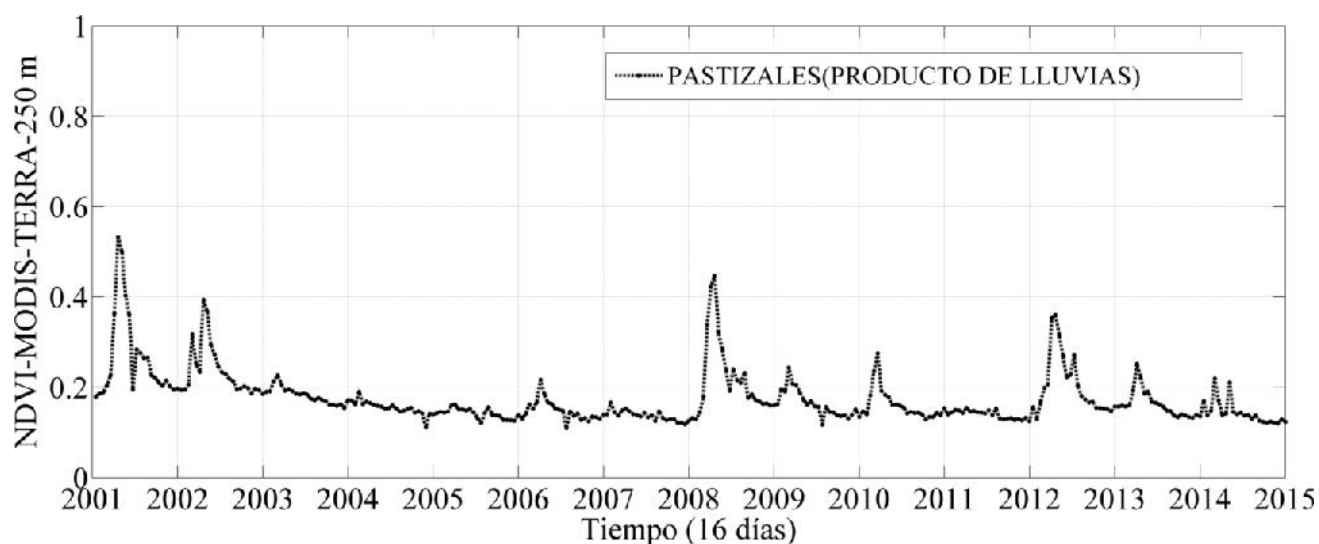
La Figura 5.17, representa la serie temporal de los valores promedio de NDVI del reservorio Boro localizado en el distrito de Pomalca, los valores de NDVI en una superficie cubierta por agua, presenta valores negativos en un rango de -1 a 0, los valores positivos predominan en la serie temporal de la Figura 5.12, esto se debe a que existe cubiertas con actividad fotosintética en diferentes partes del reservorio Boro.



**Figura 5. 17.** Serie de tiempo promedio de NDVI del sensor MODIS, periodo 2001 - 2014. Obtenida a partir de los “*Perímetros GIS*” mostrados en color azul (clase agua, reservorio Boro) de la Figura 5.5.

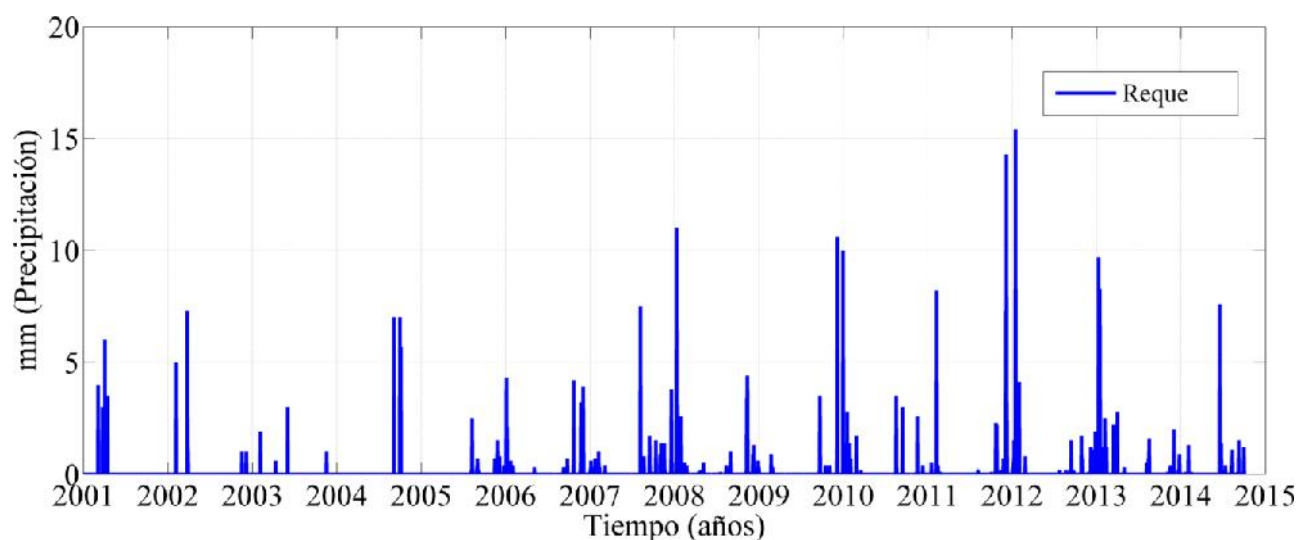
Fuente: Elaboración propia.

La variabilidad del NDVI en las partes altas entre 75 - 826 m.s.n.m. dentro del área de estudio, donde no es posible la instalación de cultivos de arroz por lo abrupto del terreno. La Figura 5.18 muestra la serie temporal perteneciente a la clase de cerros, Figura 5.12. Mediante el análisis del Máximo Valor Compuesto, Figura 5.7, se puede observar abundante vegetación en esta área, un análisis visual en la imagen de Máximo Valor Compuesto de NDVI del sensor ETM+, puede generar confusión al instante de detectar áreas de cultivos de arroz. Las imágenes MODIS de alta resolución temporal son de gran ayuda para discriminar estas áreas mediante la variabilidad temporal de NDVI, definida para un cultivo de arroz en un rango de valores promedio mayor a 0,7 NDVI. La serie temporal de NDVI, Figura 5.18, presenta valores altos en los años 2001, 2002, 2008, 2010, 2012, 2013 y 2014, los cuales contrastan con los valores de la serie temporal de precipitaciones pertenecientes a la estación meteorológica del distrito de Reque, mostradas en la Figura 5.19.



**Figura 5. 18.** Serie de tiempo promedio de NDVI del sensor MODIS, periodo 2001 - 2014. Obtenida a partir de los “Perímetros GIS” de la superficie punteada presente (clase de cerros, obtenida entre las elevaciones de 75 - 826 m.s.n.m.) en la Figura 5.12.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5. 19.** Serie temporal de precipitación periodo 2001 - 2014, datos obtenidos de la estación meteorológica localizada en el distrito de Reque (Estación Convencional, con recepción de datos en tiempo real, datos obtenidos por cortesía del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú-SENAMHI).

Fuente: Elaboración propia.

### **5.7. Estimación de la conductividad eléctrica a partir de los valores de reflectancia espectral de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 de la imagen del sensor ETM+ del satélite LandSat-7 de fecha 20/11/2007**

Para estimar la distribución espacial de la conductividad eléctrica (CE), se correlacionó los valores de reflectancia espectral del suelo obtenidos de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 del sensor ETM+ con los datos de conductividad eléctrica del suelo (CE), analizados en el laboratorio de la Facultad de Agronomía de la UNPRG, se generó modelos estadísticos de regresión lineal simple y múltiple, posteriormente se aplicó uno de los modelos de regresión lineal múltiple, a la imagen de reflectancia espectral del sensor ETM+ de fecha 20/11/2007, época donde las áreas de cultivos de arroz se encuentran en preparación o época de barbecho, de esta forma se clasificó por rangos la conductividad eléctrica del suelo en el área de estudio.

#### **5.7.1. Extracción de los valores de reflectancia espectral para cada una de las bandas a partir de las coordenadas de cada una de las muestras de campo**

Para obtener la distribución espacial de la conductividad eléctrica en la superficie del suelo del área de estudio, se correlacionó los valores de reflectancia espectral (bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 del sensor ETM+) frente a los valores de CE del suelo (dS/m), generando modelos estadísticos de regresión lineal simple y múltiple. Mediante este procedimiento se obtuvo una imagen, de distribución espacial de la conductividad eléctrica del suelo en el área de estudio, clasificando por rangos, la conductividad eléctrica del suelo a partir del modelo de regresión lineal múltiple.

Para obtener los valores de reflectancia espectral del suelo, en cada punto de muestreo, se utilizó el sistema de coordenadas UTM, y con ayuda de un GPS, se obtuvo las coordenadas en cada uno de los puntos al instante de la extracción de cada muestra de campo, tomadas en el

mes de octubre del año 2007 (18/10/2007), tiempo en el cual las parcelas de cultivos de arroz en el área de estudio se encuentran en descanso, con ayuda de las coordenadas obtenidas por el GPS, donde se ubicaron los puntos de muestreo en la imagen satelital de reflectancia espectral. Una vez localizados todos los puntos muestreados en la imagen satelital, se procede a extraer, los valores de reflectancia espectral de cada uno de los pixeles localizados en las muestras de suelo. La técnica de extracción del valor numérico de cada pixel, consiste en tomar el valor promedio de una matriz de 3x3 pixeles donde el pixel central es el que contiene la muestra de conductividad eléctrica del suelo. Este proceso se logró con ayuda del software de procesamiento de imágenes satelitales ENVI 5.1 y el lenguaje de programación IDL 8.3.

#### **5.7.2. Modelos de regresión lineal simple entre la CE del suelo frente a los valores de reflectancia espectral de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 del sensor ETM+**

Utilizando las coordenadas de los puntos, de cada muestra de CE del suelo en la superficie del área de estudio (fecha 18/10/2007), permitió obtener los valores de reflectancia espectral del suelo en la imagen satelital, correspondiente a las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 del sensor ETM+, a bordo del satélite LandSat-7, de fecha 20/11/2017, próxima a la fecha de extracción de las muestras de suelo.

Se desarrolló modelos estadísticos de regresión lineal simple, que permitieron cuantificar la relación que existe entre la reflectancia espectral del suelo en las diferentes bandas (variable dependiente) y la conductividad eléctrica del suelo (variable independiente). Los resultados obtenidos permitieron identificar las bandas que ayudaron a estimar la distribución espacial de la conductividad eléctrica del suelo, usando imágenes de reflectancia espectral del suelo del satélite artificial LandSat-7. La Tabla 5.2 muestra los modelos de regresión lineal simple, obtenidos a partir de la relación que existe entre la CE del suelo y los valores de

reflectancia espectral del suelo, de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7, mediante el método estadístico de mínimos cuadrados.

**Tabla 5. 2.**

*Modelos estadísticos de regresión lineal simple, mediante el método de mínimos cuadrados, entre los valores de CE del suelo (48 muestras) y reflectancia espectral del suelo, de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 del sensor ETM+ LandSat-7.*

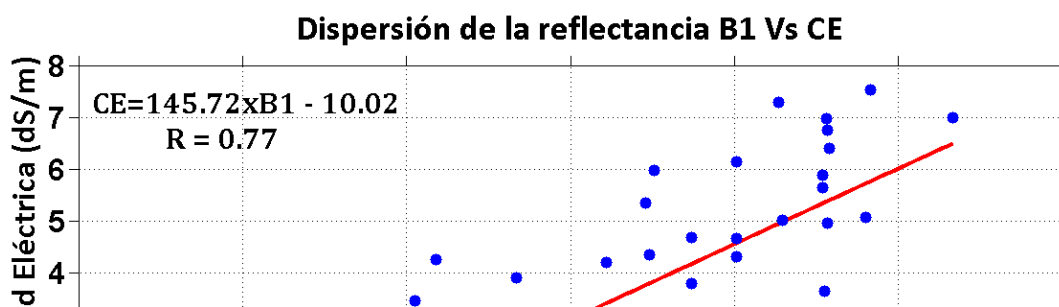
CE	Correlación	Modelos de regresión	R	Figura
1	CE vs Reflectancia B1	$CE = 145,72 \times B1 - 10,02$	$R=0,77$	a
2	CE vs Reflectancia B2	$CE = 121,56 \times B2 - 10,17$	$R=0,77$	b
3	CE vs Reflectancia B3	$CE = 95,01 \times B3 - 8,91$	$R=0,76$	c
4	CE vs Reflectancia B4	$CE = 77,85 \times B4 - 9,99$	$R=0,71$	d
5	CE vs Reflectancia B5	$CE = 50,57 \times B5 - 6,70$	$R=0,69$	e
6	CE vs Reflectancia B7	$CE = 42,15 \times B7 - 3,64$	$R=0,64$	f

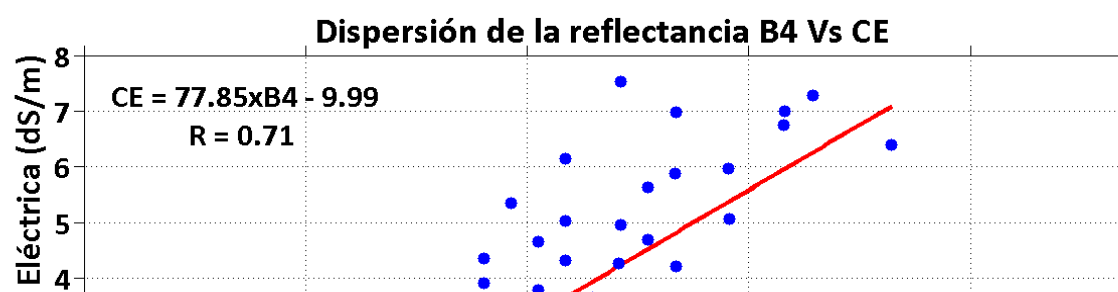
Fuente: Elaboración propia.

La baja reflectividad de la radiación incidente en el espectro visible (bandas 1, 2 y 3) del sensor ETM+ mostrados en la Figura 5.1 y 5.2 se debe al efecto absorbente de los pigmentos presentes en las hojas del cultivo, principalmente clorofila, xantofila y caroteno (65, 29 y 6 % respectivamente [9]. Presenta una alta absorción de la radiación incidente proveniente del Sol en las bandas: banda 1 (azul) en torno a los  $0,483 \mu\text{m}$ , y en la banda 3 (rojo) en torno a los  $0,662 \mu\text{m}$ . Se observa un efecto absorbente relativamente menor a las bandas 1 y 3, que pertenece a la banda 2 (verde) en torno a los  $0,560 \mu\text{m}$  del espectro electromagnético. La diferencia de absorción entre las bandas 1, 3 y la banda 2 se debe a que un porcentaje relativamente alto de radiación incidente es reflejada por los pigmentos de las hojas con respecto a las bandas 1 y 3, este porcentaje de radiación reflejada causa el color con el que

nuestros ojos perciben la vegetación vigorosa de color verde, es el caso de un cultivo de arroz en muy buen estado de salud. Las hojas del cultivo de arroz absorben un porcentaje de radiación solar relativamente igual, en las bandas 1 y 3, según se muestra en las Figuras 5.1 y 5.2, reflejando en un muy alto porcentaje la radiación incidente en el infrarrojo cercano (IRC), entorno a los  $0,835 \mu\text{m}$  de la banda 4 del sensor ETM+.

Las muestras de CE del suelo fueron extraídas en una época donde no existían cultivos de arroz, el suelo se encontraba en el estado de preparación para la próxima instalación del cultivo de arroz, es importante este análisis, porque facilita una mejor clasificación de la CE del suelo, a través de la reflectancia espectral. En el caso que exista cultivos de arroz es necesario realizar el análisis mediante el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) frente a los valores de CE del suelo. La alta dispersión en los modelos estadísticos de regresión lineal simple, se debe principalmente a la dinámica de las sales que existe en la estructura interna del sub-suelo, por efectos de la alta evaporación y el nivel freático que se encuentra próximo a la superficie del suelo. Esta situación permite el movimiento de electrolitos en toda la estructura del subsuelo, en diferentes direcciones, cambiando a cada instante en la zona de raíz de los cultivos de arroz (0,30 m).







**d****e****f**

**Figura 5. 20.** Las gráficas a), b), c), d) , e), f) muestran la relación que existe entre los valores de conductividad eléctrica del suelo de fecha 18/10/2007 y los valores de reflectancia espectral del suelo de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 del sensor ETM+-Landsat-7 de fecha 20/11/2007.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.7.3. Modelos de regresión lineal múltiple de la CE del suelo vs valores de reflectancia espectral del suelo, de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 del sensor ETM+

A partir de los modelos estadísticos de regresión lineal simple mostrados en la Figura 5.20, se obtuvo los modelos estadísticos de regresión lineal múltiple, mediante el método de mínimos cuadrados. Se correlacionó los valores de conductividad eléctrica del suelo (dS/m) frente a los valores de reflectancia espectral del suelo de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 del sensor ETM+ (20/11/2007). Se obtuvo diferentes modelos de regresión lineal múltiple, variando en los valores de sus coeficientes de las bandas y los interceptos. Los coeficientes de correlación no presentan mucha diferencia. La pequeña diferencia que existe entre los coeficientes se debe a la alta relación que existe entre la conductividad eléctrica del suelo frente a la reflectancia espectral de este.

**Tabla 5. 3.**

*Modelos de regresión lineal múltiple para estimar la conductividad eléctrica del suelo (dS/m), a partir de la imagen de reflectancia espectral del suelo (B1, B2, B3, B4, B5 y B7 del sensor ETM+ - Landsat-7) y datos de campo de CE (48 datos).*

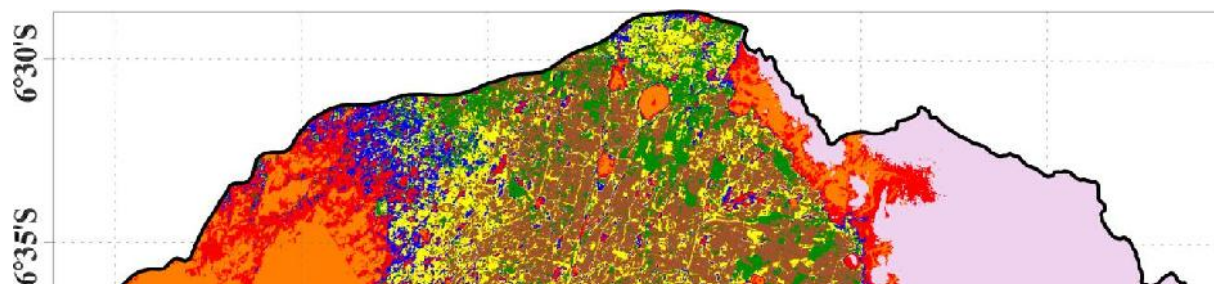
Ec.	Ecuación	$R^2$	$R$
-----	----------	-------	-----

1	$CE = 68,73 \times B1 + 66,47 \times B2 - 10,35$	0,61	0,78
2	$CE = 98,22 \times B1 + 32,54 \times B3 - 9,86$	0,60	0,77
3	$CE = 101,84 \times B1 + 34,44 \times B4 - 11,91$	0,64	0,80
4	$CE = 134,71 \times B2 - 10,56 \times B3 - 10,27$	0,60	0,77
5	$CE = 90,48 \times B2 + 26,45 \times B4 - 11,25$	0,62	0,78
6	$CE = 67,56 \times B3 + 29,36 \times B4 - 10,41$	0,60	0,78
7	$CE = 77,40 \times B1 + 103,00 \times B2 - 34,93 \times B3 - 10,70$	0,61	0,78
8	$CE = 112,90 \times B1 - 11,63 \times B2 + 36,33 \times B4 - 11,95$	0,64	0,80
9	$CE = 67,84 \times B1 + 68,92 \times B2 - 0,89 \times B5 - 10,36$	0,60	0,80
10	$CE = 121,79 \times B2 - 25,94 \times B3 + 27,28 \times B4 - 11,53$	0,62	0,78
11	$CE = 137,61 \times B1 + 58,93 \times B2 - 76,96 \times B3 + 40,95 \times B4 - 12,93$	0,65	0,81
12	$CE = 152,22 \times B2 - 21,88 \times B3 + 45,86 \times B4 - 29,43 \times B5 - 12,77$	0,63	0,80
13	$CE = 147,88 \times B2 - 12,96 \times B3 + 33,12 \times B4 - 23,08 \times B6 - 13,27$	0,64	0,80
14	$CE = 128,52 \times B1 + 90,10 \times B2 - 69,99 \times B3 + 56,57 \times B4 - 26,14 \times B5 - 13,94$	0,66	0,81

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 5.3, muestra los modelos estadísticos de regresión lineal múltiple de la conductividad eléctrica del suelo frente a los valores de reflectancia espectral del suelo, se utilizó el modelo que representa la ecuación 11 con un coeficiente de correlación “R” igual a 0,81. Este modelo de regresión lineal múltiple (ecuación 11), se aplicó al conjunto de imágenes de reflectancia espectral del sensor ETM+ de fecha 20 de Noviembre del 2007, próxima a la fecha de extracción de las muestras de suelo en el área de estudio (trabajo de campo). De esta manera se pudo obtener un mapa temático de la distribución espacial de la CE del suelo del área de estudio, en cinco clases como se establece en la Tabla 4.6, cuyo resultado se muestra en la Figura 5.21.

### 5.8. Distribución espacial de la conductividad eléctrica del suelo en la Cuenca Chancay Lambayeque, Intercuenca 137771



**Figura 5. 21.** Mapa temático de conductividad eléctrica del suelo, de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771. Su obtención, fue aplicando la ecuación 11 de la Tabla 5.3, a cada una de las bandas de reflectancia espectral del suelo, debidamente procesadas, obtenidas del sensor ETM+ del día 20 de noviembre del 2007, fecha de adquisición de la imagen multiespectral utilizada. Se obtuvo 5 clases diferenciadas mediante los colores: marrón, amarillo, azul, rojo y naranja con su respectivo rango de CE del suelo. Las clases celeste y verde se aplicaron a partir de los “*Perímetros GIS*”, obtenidos mediante valores de NDVI entre (-1 - 0) y (0,29 - 1) respectivamente presentes en la Figura 5.5. La clase cerros se aplicó el “*Perímetro GIS*” obtenido a partir de una imagen DEM (Modelo de Elevación Digital) entre las elevaciones 75 - 826 m.s.n.m., Figura B.1 mostrada en el anexo B.

Fuente: Elaboración propia.

Usando un programa en el lenguaje de programación IDL, se aplicó la ecuación 11 de la Tabla 5.3 a cada una de las bandas (B1, B2, B3 y B4) de la imagen de reflectancia espectral de fecha 20/11/2007 del sensor ETM+, generando una imagen temática de la distribución espacial de la CE del suelo en toda la Intercuenca 137771. Al finalizar este procedimiento se generó una máscara de aquellas áreas verdes presentes en esa fecha y que no pertenecen a cultivos de arroz. También se generó una máscara de áreas con una altitud entre 75 - 826 msnm, áreas donde nunca se ha sembrado cultivos de arroz por lo abrupto y empinado del terreno, quedándose solo con suelos desnudos, suelos en barbecho, caminos y poblaciones. Para obtener un mejor resultado, se clasificó en cinco rangos según la Tabla 4.6. El área de estudio es aproximadamente 145 209,24 ha, de los cuales se ha encontrado 18 382,40 ha (corresponde al 12,66% del área total) de áreas verdes que no pertenecen a cultivos de arroz para la fecha en que se trabajó la imagen satelital. Dichas áreas se muestran, en color verde en la imagen de la Figura 5.5 y Figura 5.21, pertenecen a bosques, dunas, pastizales y cultivos de caña, etc. 20 196,24 ha (corresponde al 13,90% del área total) con una elevación entre 75 - 826 m.s.n.m., denominado clase cerros mostrada en la Figura 5.12. 109,98 ha (corresponde al 0,08 % del área total) pertenecientes al reservorio Boro en el distrito de Pomalca y posas de oxidación en el distrito de San José. Una vez separadas estas áreas, donde no se han instalado cultivos de arroz se procede analizar aquellas donde posiblemente se instalaron cultivos de arroz, la cual se definirá mediante la variación de la serie temporal del NDVI para cada una de las clases.

La clase de color marrón, con una distribución espacial de la conductividad eléctrica del suelo entre 0 - 2 dS/m, presentó un área aproximada de 21 602,25 ha (un aproximado del 14,88 % del área total), esta clase pertenece a suelos de muy buena calidad para la instalación y producción

de cultivos de arroz. Estos niveles de CE del suelo son óptimos y no generarían pérdidas significativas en la producción según la Tabla 4.7.

La clase de color amarillo, presentó una distribución espacial de conductividad eléctrica del suelo entre 2 - 4 dS/m, que corresponde a una área aproximada de 22 426,51 ha (un aproximado del 15,44 % del área total). Los suelos de esta clase son de regular calidad para la producción de cultivos de arroz, por la baja CE del suelo que presenta, según la Tabla 4.7 son terrenos óptimos para la siembra de cultivos de arroz.

Se obtuvo 13 436,73 ha que pertenecen a la clase de color azul, con una distribución espacial de la conductividad eléctrica del suelo entre 4 - 8 dS/m (un aproximado del 9,25 % del área total). Los suelos de esta clase presentan una conductividad eléctrica muy alta, por lo tanto, según la Tabla 4.7, un cultivo de arroz instalado en un suelo con estas características de CE, tendría pérdidas considerables en la producción, por lo tanto, son suelos de baja calidad para los cultivos de arroz.

La clase de color rojo presenta un total de 22 848,12 ha (un aproximado del 15,74 % del área total), los valores de conductividad eléctrica en esta clase de suelos varía entre 8 - 16 dS/m, dichas áreas pertenecen a suelos en descanso, caminos, y suelos con un alto grado de concentración de sales solubles en el suelo sub-suelo, debido a la elevada conductividad que presentan.

La clase de color naranja que representa a 26 207,01 ha (un aproximado del 18,05 % del área total), los suelos de esta clase presentan una conductividad eléctrica extremadamente alta, dichas áreas pertenecen a arenales, caminos y poblaciones.

Sumando las áreas de las clases marrón y amarillo se tiene un total de 44 028,76 ha (un aproximado del 30,32 % del área total), un valor relativamente mayor al área obtenida mediante la desviación estándar, representado por las áreas de color verde en la Figura 5.12.

Las superficies pertenecientes a las clases de color marrón y amarillo, presentan una distribución espacial de la conductividad eléctrica del suelo entre 0 - 4 dS/m, según la Tabla 4.7 indica que las clases marrón y amarillo se encuentran dentro del rango, para la siembra de cultivos de arroz, obteniendo un buen rendimiento, con una pérdida menor al 12 % en la producción si se cultiva en las áreas de la clase color amarillo. Los terrenos que presentan valores de conductividad eléctrica del suelo mayores a 4 dS/m son tierras no aptas para el cultivo de arroz, las pérdidas en la producción serían muy elevadas según los valores de la Tabla 4.7.

Para comprobar este resultado, se obtuvo el “*Perímetro GIS*” de cada una de las cinco clases obtenidas en la Figura 5.21, y con ayuda del lenguaje de programación IDL se aplicó cada uno de estos “*Perímetro GIS*”, al conjunto de imágenes del NDVI del sensor MODIS, periodo 2001 – 2014, obteniéndose la variación temporal del NDVI para cada una de las clases.

La Figura 5.22 muestra la variación temporal de valores promedio del NDVI durante catorce años, de cada una de las clases mostradas en la Figura 5.21.

La variabilidad del NDVI, en las áreas con una CE del suelo entre 0 - 2 dS/m presentan valores promedio del NDVI entre 0,0 – 0,8, indicando que en dichas áreas presentadas en color marrón, se ha cultivado arroz durante todo este tiempo, obteniendo muy buena producción.

Los valores promedio del NDVI presentados en color amarillo varían entre 0,0 – 0,7 NDVI aproximadamente pertenecientes a áreas con valores de CE del suelo entre 2 - 4 dS/m, los cultivos de arroz instalados en suelos con estos valores de CE, presentan pérdidas en el rendimiento menor al 12 %. Esto se observa comparando la variación en amplitud, de las series temporales del NDVI para las clases marrón y amarillo, presentada en la Figura 5.22.

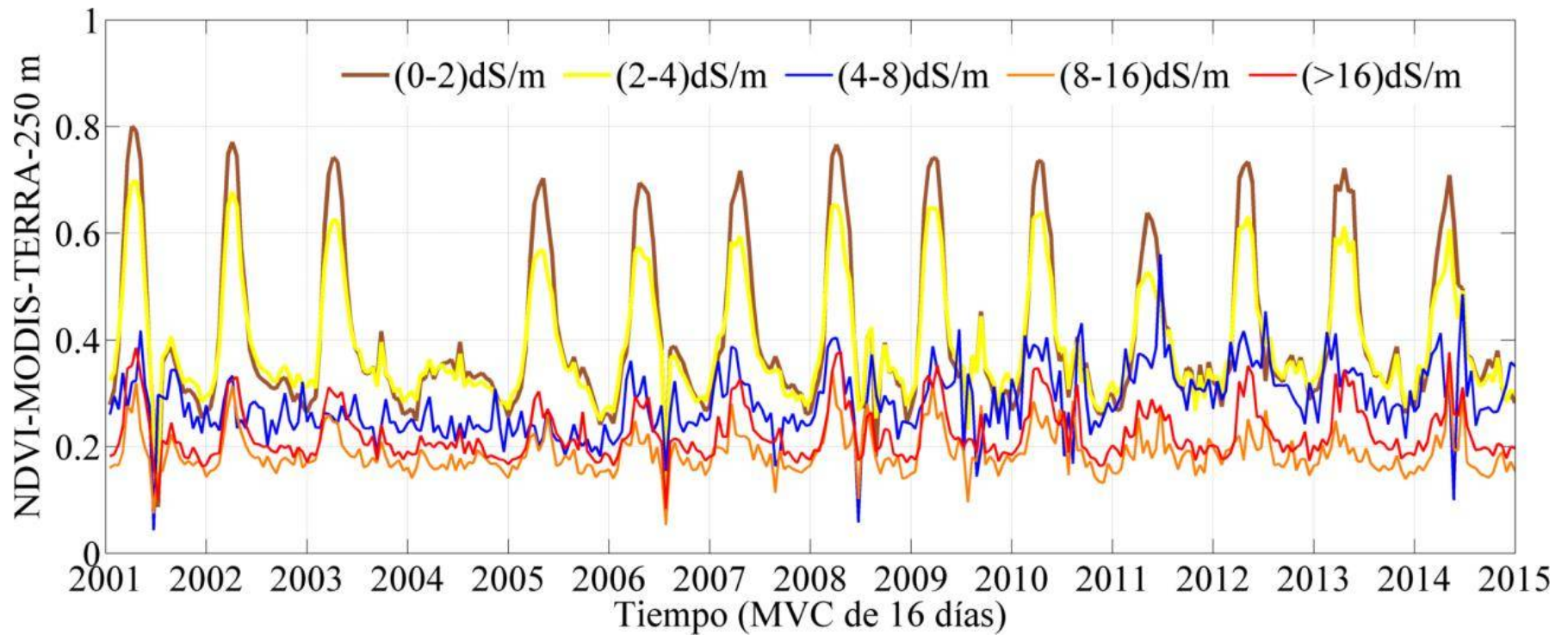
Las áreas correspondientes a las clases presentadas en los colores azul, rojo y naranja, tienen una CE del suelo mayor a 4 dS/m, por eso en estas áreas no se instalan cultivos de arroz,

como se puede verificar en la variación temporal del NDVI presentada en la Figura 5.22, donde los valores promedio del NDVI no sobrepasan el valor 0.4 NDVI.

Es notable una anomalía, en las series temporales del NDVI presentadas en las Figuras 5.22 y 5.15, que tiene su inicio en el año 2003 y se prolonga hasta el año 2005, recuperándose en forma progresiva, y tiene su efecto máximo en el año 2004 que corresponde a un periodo de *sequía* regional, evento climatológico producido en la costa norte del Perú en dicho año.

En el año 2011 ocurre un evento muy similar siendo sus efectos negativos, mucho menor a lo sucedido en el año 2004. Los eventos de *sequía* suscitados en los años 2004 y 2011, fueron detectados por [10], mediante un análisis de la variación temporal del vapor de agua precipitable (PWV-siglas en inglés) en la costa norte del Perú, usando imágenes satelitales.





**Figura 5. 22.** Serie temporal de la variación del valor promedio de NDVI del sensor MODIS para cada una de las clases de la Figura 5.21. La variación estacional del NDVI en el tiempo para las clases marrón y amarillo indican que dichas áreas pertenecen a cultivos de arroz se da esta afirmación por que las otras clases no superan el valor 0,4 de NDVI esto demuestra que en dichas áreas no se instalan cultivos de arroz.

Fuente: Elaboración propia.

### **5.9. Análisis de la variación temporal del NDVI del sensor MODIS para cada uno de los distritos pertenecientes a la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771**

Se analizó las series de tiempo del NDVI de las áreas clasificadas como aptas para la siembra del cultivo de arroz, estas áreas presentan un rango de CE del suelo entre [0 - 4] dS/m mostradas en la Figura 5.21. El análisis se realizó a cada uno de los distritos pertenecientes a la intercuenca mostrados en las Figuras 5.23, 5.25, 5.27, 5.29, 5.31, 5.33, 5.35 para un mejor entendimiento de la dinámica del cultivo de arroz en el tiempo. La variación temporal del NDVI de cada distrito presenta una estacionalidad cuasi periódica, presentando una interrupción a la periodicidad en el año 2004.

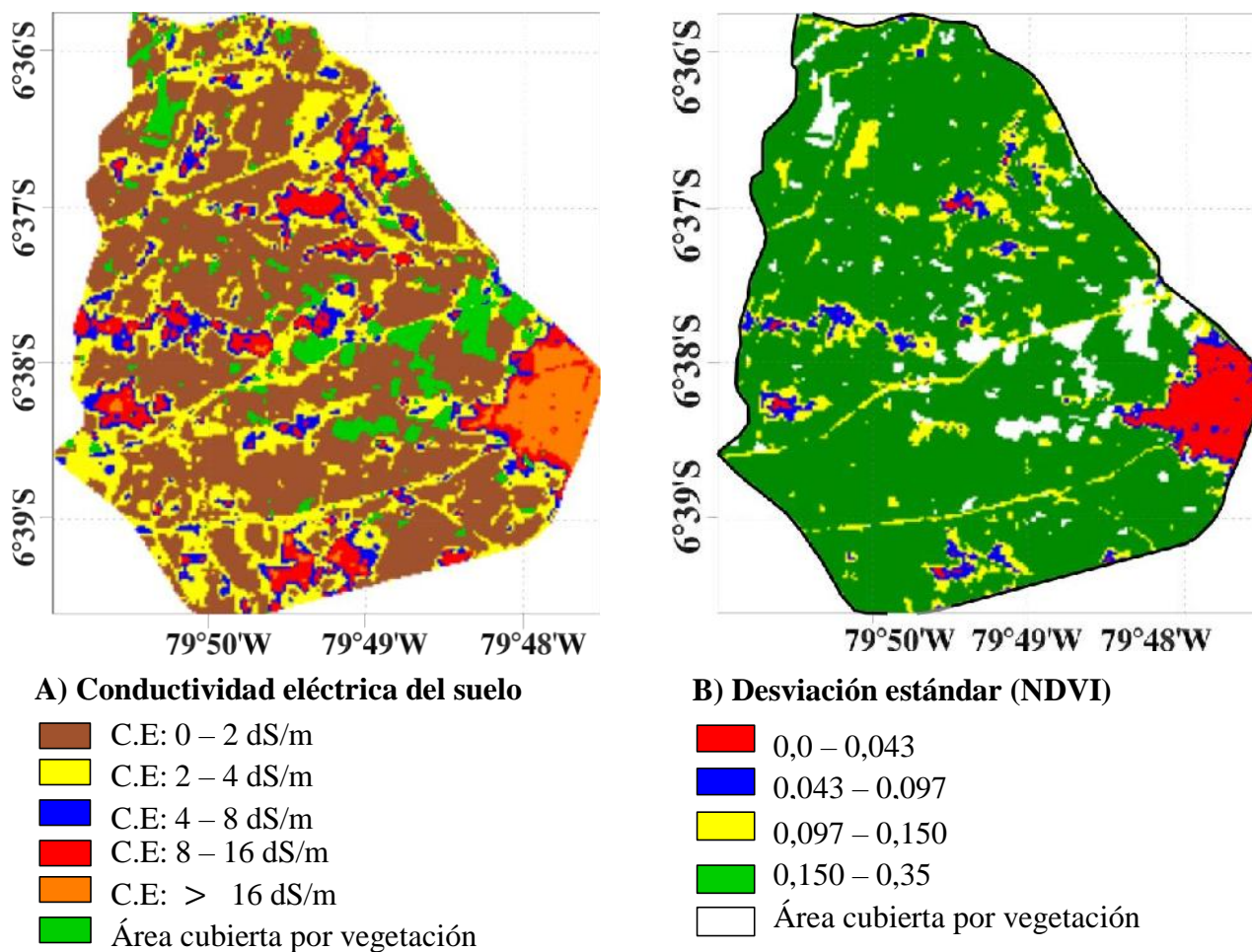
Con la finalidad de determinar la distribución de la energía en función de la frecuencia se realizó un análisis espectral de las series de tiempo del NDVI de cada distrito. La estacionalidad del proceso geofísico es una condición importante para realizar un análisis espectral [10]. Las series temporales del NDVI que cumplen con esta condición, están presentes en el periodo 2005-2014, mostrada en la Figura 5.37.

#### **Distrito de Pueblo Nuevo**

La serie temporal del NDVI de las clases marrón y amarillo se obtuvieron con ayuda del “*Perímetro GIS*” de cada clase del mapa de CE del suelo Figura 5.23 A. La Figura 5.23 B muestra la desviación estándar del NDVI del distrito de Pueblo Nuevo para el periodo 2001-2014, donde la clase de color verde presenta las áreas con valores de máxima variación del NDVI, existente sobre la superficie del suelo en dicho periodo.

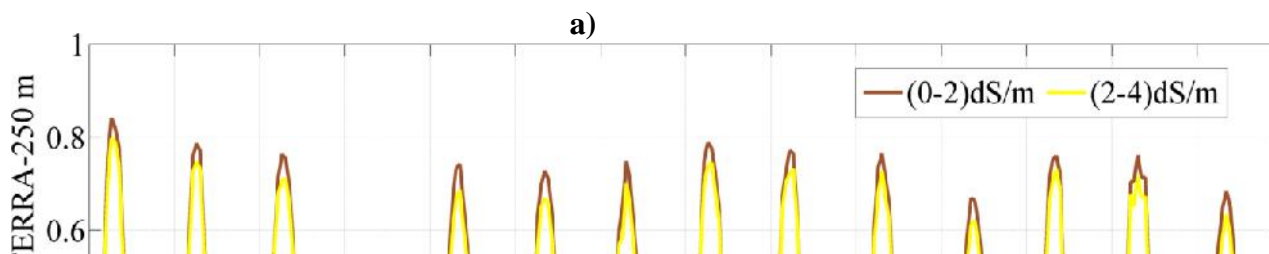
Con ayuda del software ENVI 5.1, se obtuvo cada una de las áreas aproximadamente; en el mapa “A” se tiene un área de 2 521,26 ha correspondiente a las clases marrón y amarillo y 2

406,15 ha del mapa “B”, que corresponde a la clase de color verde representado por la desviación estándar.



**Figura 5. 23.** Mapa de CE del suelo del distrito de Pueblo Nuevo “A” para la fecha de adquisición de la imagen del sensor ETM+ 20 de noviembre del 2007. El mapa de Desviación estándar “B”, obtenido a partir de 25 imágenes de NDVI del sensor ETM+ para el periodo 2001-2014.

Fuente: Elaboración propia.

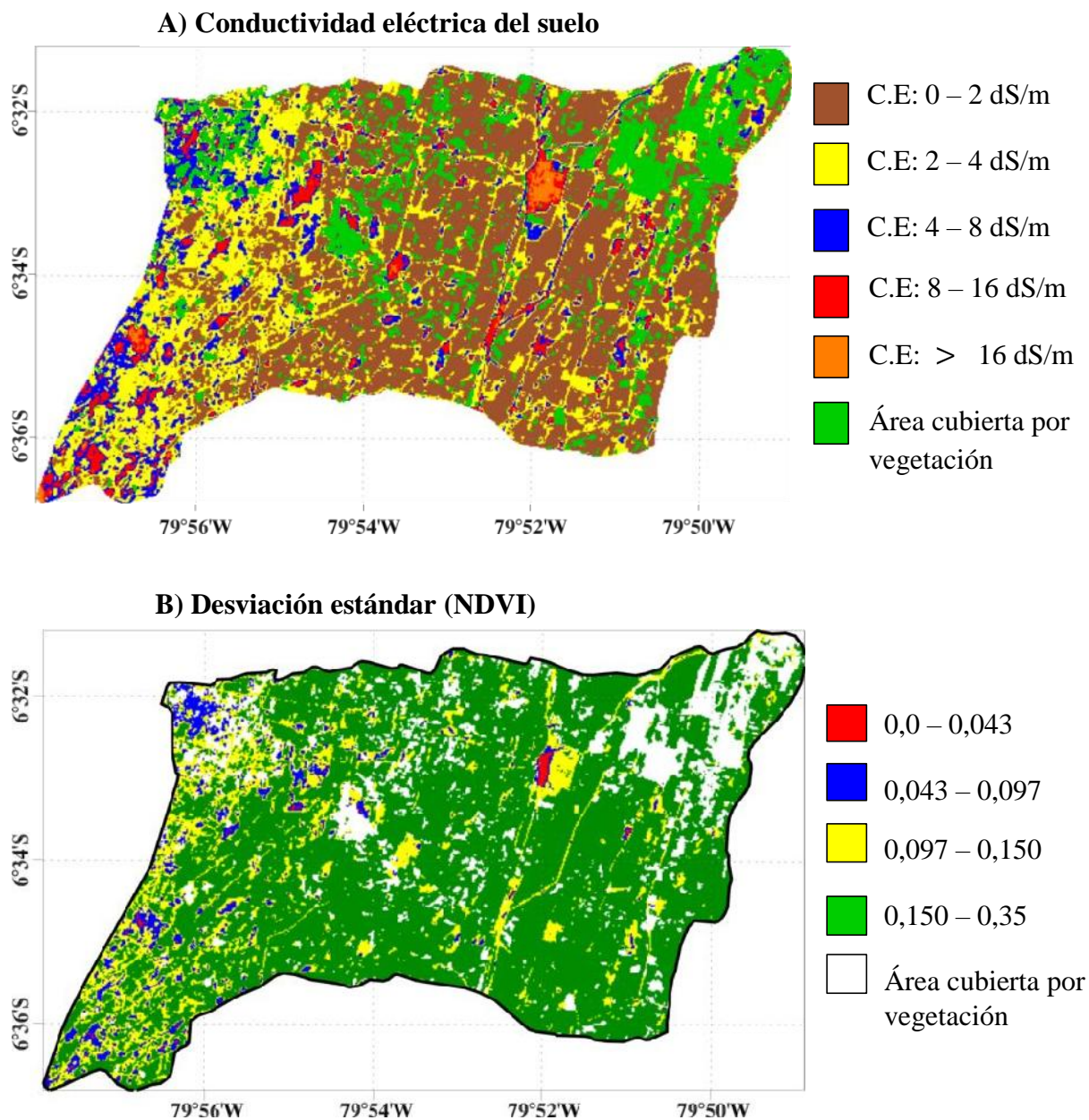


**Figura 5. 24.** Series de tiempo del valor promedio del NDVI “a” obtenida a partir del perímetro GIS con una CE del suelo de  $[0 - 4]$  dS/m, representada por los colores marrón y amarillo en la Figura 5.23. En la Figura “b” se muestra la anomalía del NDVI del distrito de Pueblo Nuevo. Fuente: Elaboración propia.

### **Distrito de Mochumi**

Se obtuvo un aproximado de 7 366,14 ha para las clases de suelo marrón y amarillo presentado en el mapa “A” de CE del suelo Figura 5.25A. 7 030,44 ha para la clase presentada en color verde del mapa “B” de desviación estándar del NDVI Figura 5.25B.

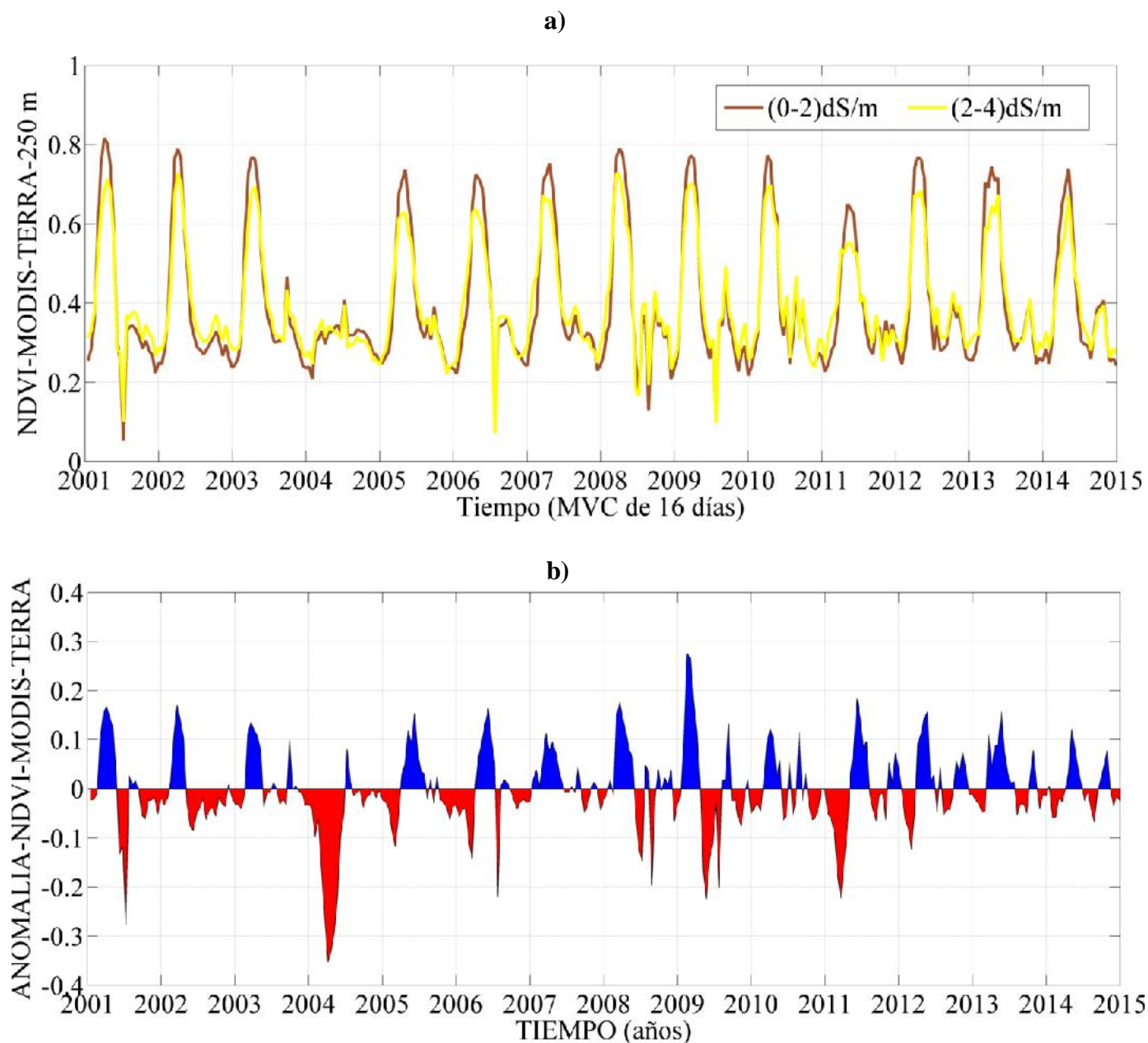
La serie temporal, de valores promedio de NDVI para las clases marrón y amarillo, muestra la estacionalidad del NDVI en la serie temporal, lo cual indica que las áreas evaluadas pertenecen a terrenos de cultivos de arroz, Figura 5.25.



**Figura 5. 25.** Mapa de CE del suelo del distrito de Mochumi “A” de fecha 20 de noviembre del 2007, sensor ETM+ LandSat-7. Mapa de desviación estándar “B” obtenido a partir de 25 imágenes de NDVI, sensor ETM+ LandSat-7 del periodo 2001-2014.

Fuente: Elaboración propia.



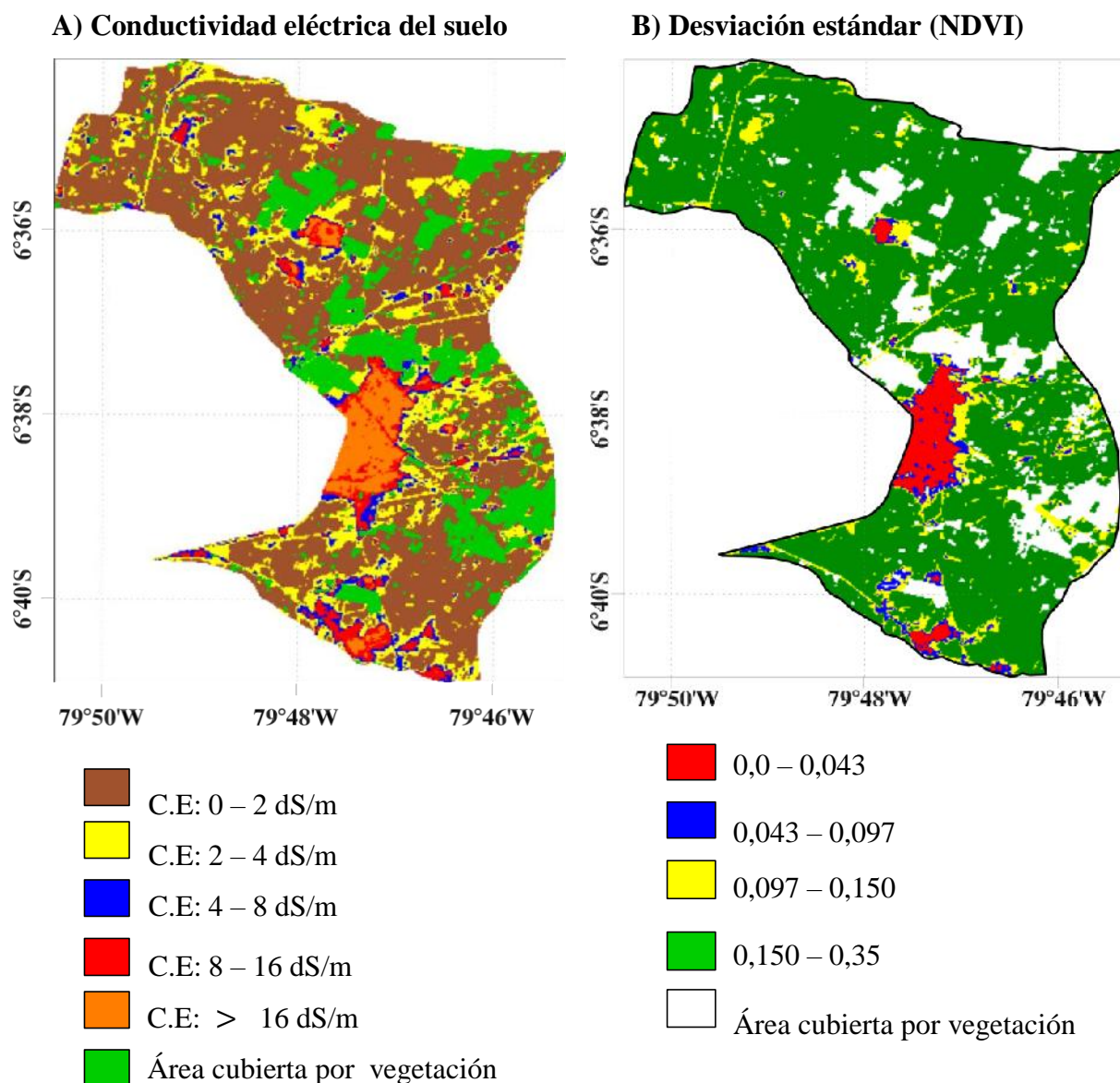


**Figura 5. 26.** Serie temporal promedio del NDVI “a”, correspondiente a las áreas con valores de CE del suelo comprendido entre [0 – 4] dS/m. Serie temporal de la anomalía del NDVI “b” registrada en el distrito de Mochumi en el periodo 2001-2014, se observó tres anomalías significativas en los años 2004, 2009 y 2011 que corresponden a eventos de sequía ocurridos en la costa norte. Fuente: Elaboración propia.

### **Distrito de Ferreñafe**

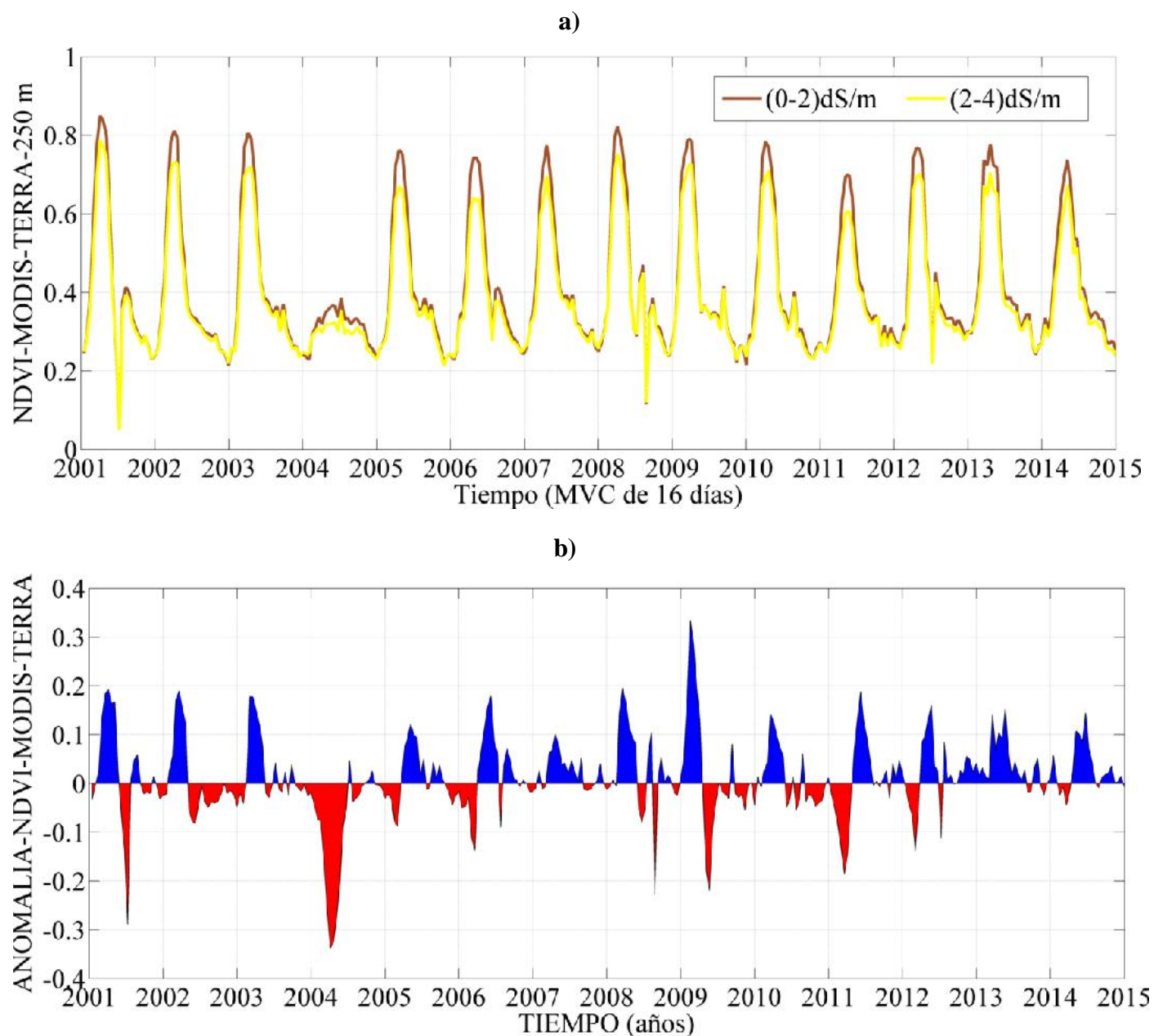
A partir del mapa “A” de la Figura 5.27, se obtuvo 4 437,90 ha para las clases de CE del suelo marrón y amarillo. El mapa “B” representa la desviación estándar del NDVI durante el

periodo 2001-2014, se obtuvo 4 418,73 ha correspondiente a la clase de color verde. En la Figura 5.28a se muestra la serie temporal de valores promedio del NDVI pertenecientes a las clases marrón y amarillo del mapa “A” de la Figura 5.27.



**Figura 5. 27.** Mapa de CE del suelo del distrito de Ferreñafe “A” de fecha 20 de noviembre del 2007, imagen del sensor ETM+ LandSat-7. Mapa de desviación estándar “B” obtenido a partir de 25 imágenes del NDVI, imagen del sensor ETM+ LandSat-7 para el periodo 2001-2014.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5. 28.** Serie temporal promedio del NDVI “a”, correspondiente a las áreas con valores de CE del suelo comprendido entre  $[0 - 4]$  dS/m. Serie temporal de la anomalía del NDVI “b” determinada en el distrito de Ferreñafe durante el periodo 2001-2014.

Fuente: Elaboración propia.

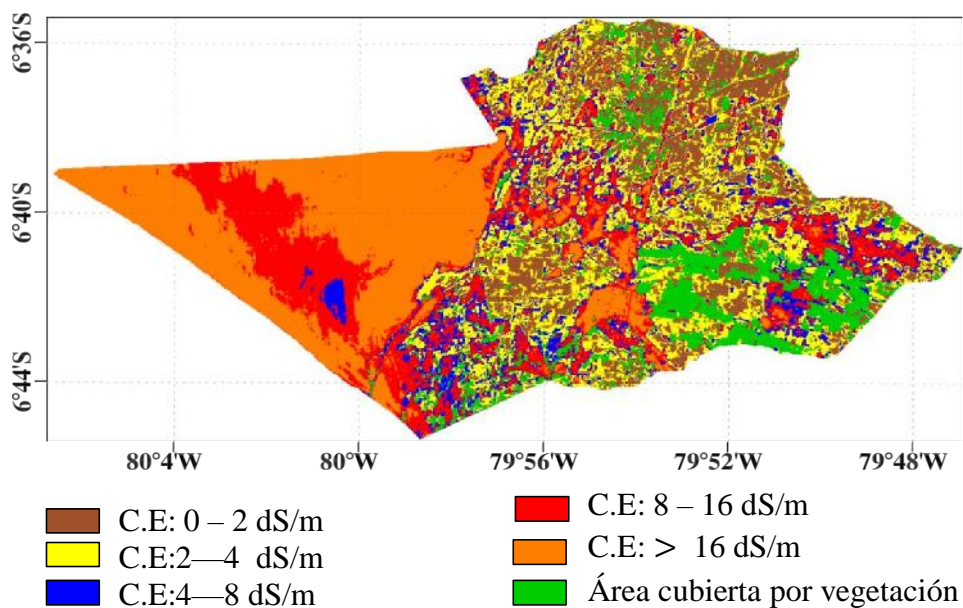
### **Distrito de Lambayeque**

El distrito de Lambayeque presenta la mayor área de producción de arroz en toda la intercuenca. La Figura 5.29A muestra el mapa de CE del suelo, se obtuvo un aproximado de 11

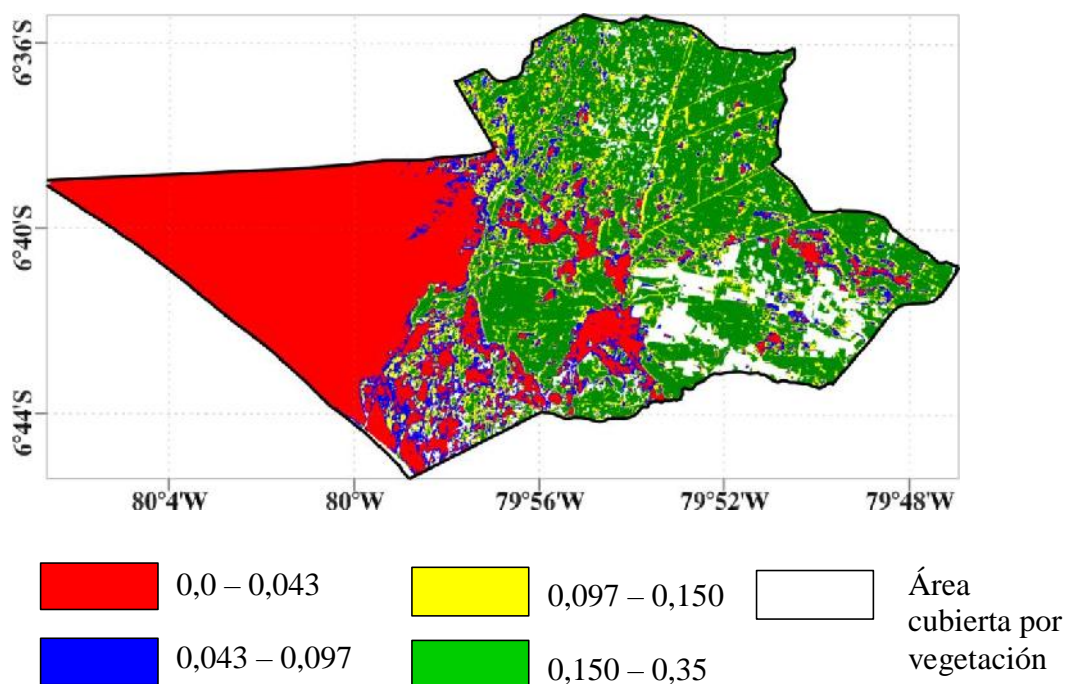


969,64 ha para las clases marrón y amarillo. La Figura 5.29 B representa la desviación estándar, del cual se obtuvo 11 987,37 ha para la clase presentada en color verde. La serie temporal de valores promedio del NDVI presentada en la Figura 5.30A perteneciente a las clases marrón y amarillo, que corresponden a áreas donde se instalan cultivos de arroz.

### A) Conductividad eléctrica del suelo

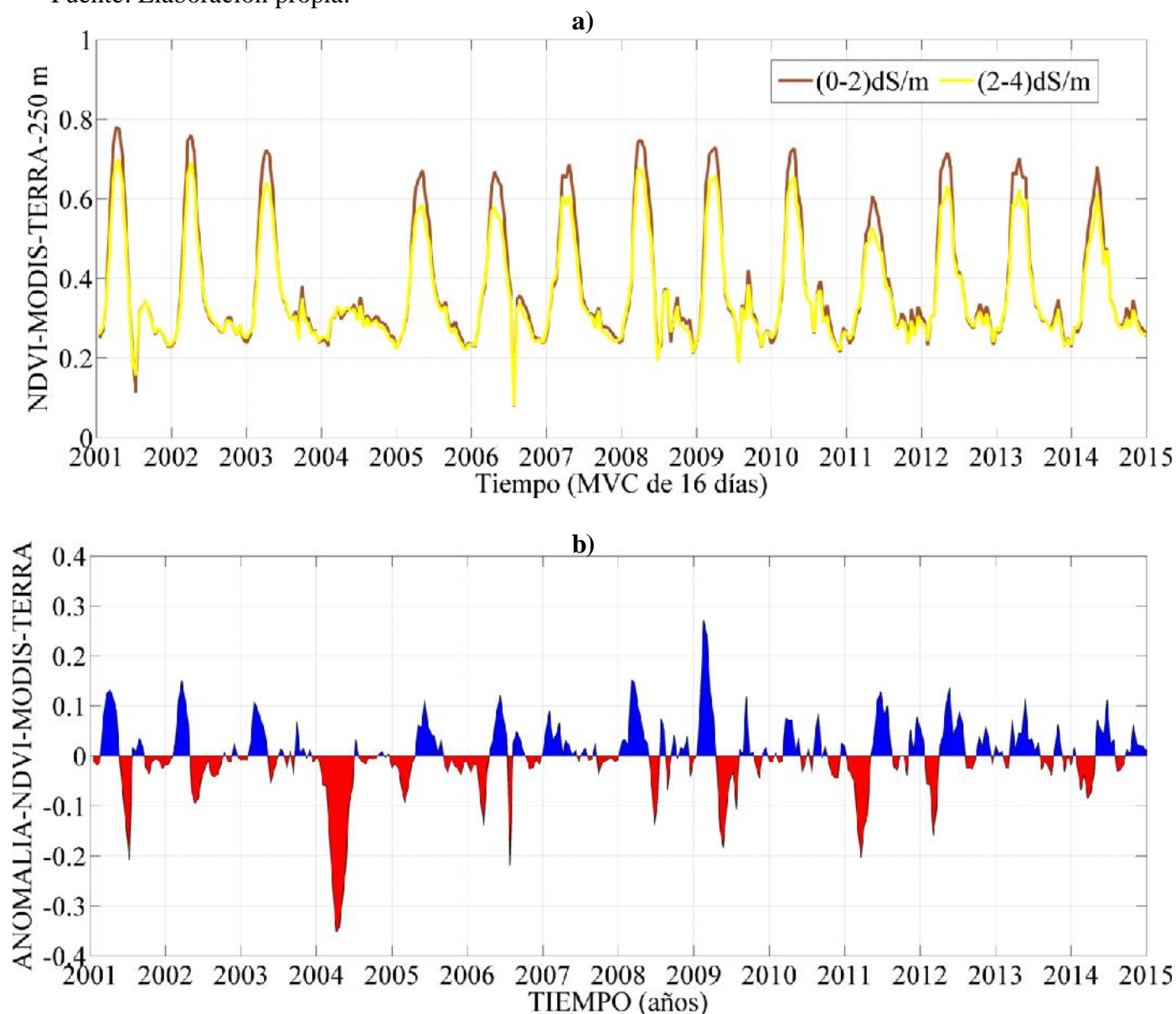


### B) Desviación estándar (NDVI)



**Figura 5. 29.** Mapa de CE del suelo del distrito de Lambayeque “A” de fecha 20 de noviembre del 2007, imagen del sensor ETM+ LandSat-7. Mapa de desviación estándar “B” obtenido a partir de 25 imágenes del NDVI, sensor ETM+ LandSat-7 del periodo 2001-2014.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5. 30.** Serie temporal promedio del NDVI “a”, correspondiente a las áreas con valores de CE del suelo comprendido entre [0 – 4] dS/m. Serie temporal de la anomalía del NDVI “b” determinada en el distrito de Lambayeque durante el periodo 2001-2014.

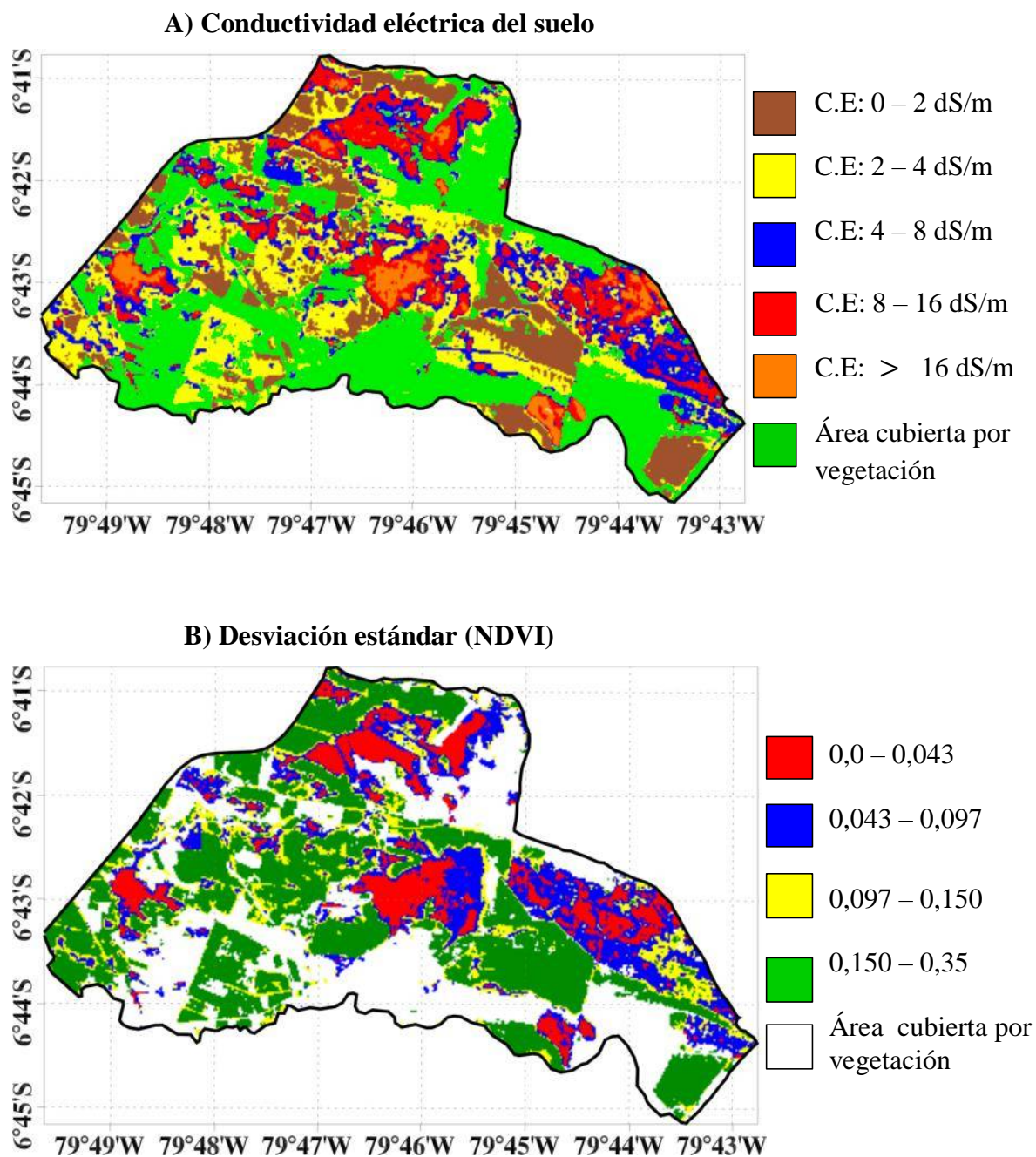
Fuente: Elaboración propia.

### **Distrito de Picsi**

Es el distrito con menor área de producción de arroz, presenta pequeñas áreas distribuidas en todo el distrito, la dificultad radica en que las pequeñas áreas no cubren la resolución espacial del pixel en una imagen del sensor MODIS ( $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ ), motivo por el cual, al momento de obtener la serie temporal de valores promedio del NDVI, el programa toma áreas que no son cultivos de arroz. La serie temporal del NDVI tiene una estructura diferente, a las series temporales presentadas en otras figuras.

Con ayuda del “*Perímetro GIS*” de las clases marrón y amarillo de la Figura 5.31A, se obtuvo el área aproximada de 1 985,13 ha. Del mapa “B” se obtuvo 1 710,45 ha, que corresponden a la desviación estándar del NDVI mostrada en la Figura 5.31B. Estas áreas corresponden a cultivos de arroz, porque, es el cultivo que genera cambios físicos sobre la superficie del suelo desde la siembra hasta la cosecha, los cuales son detectados por los sensores a bordo de los satélites artificiales.

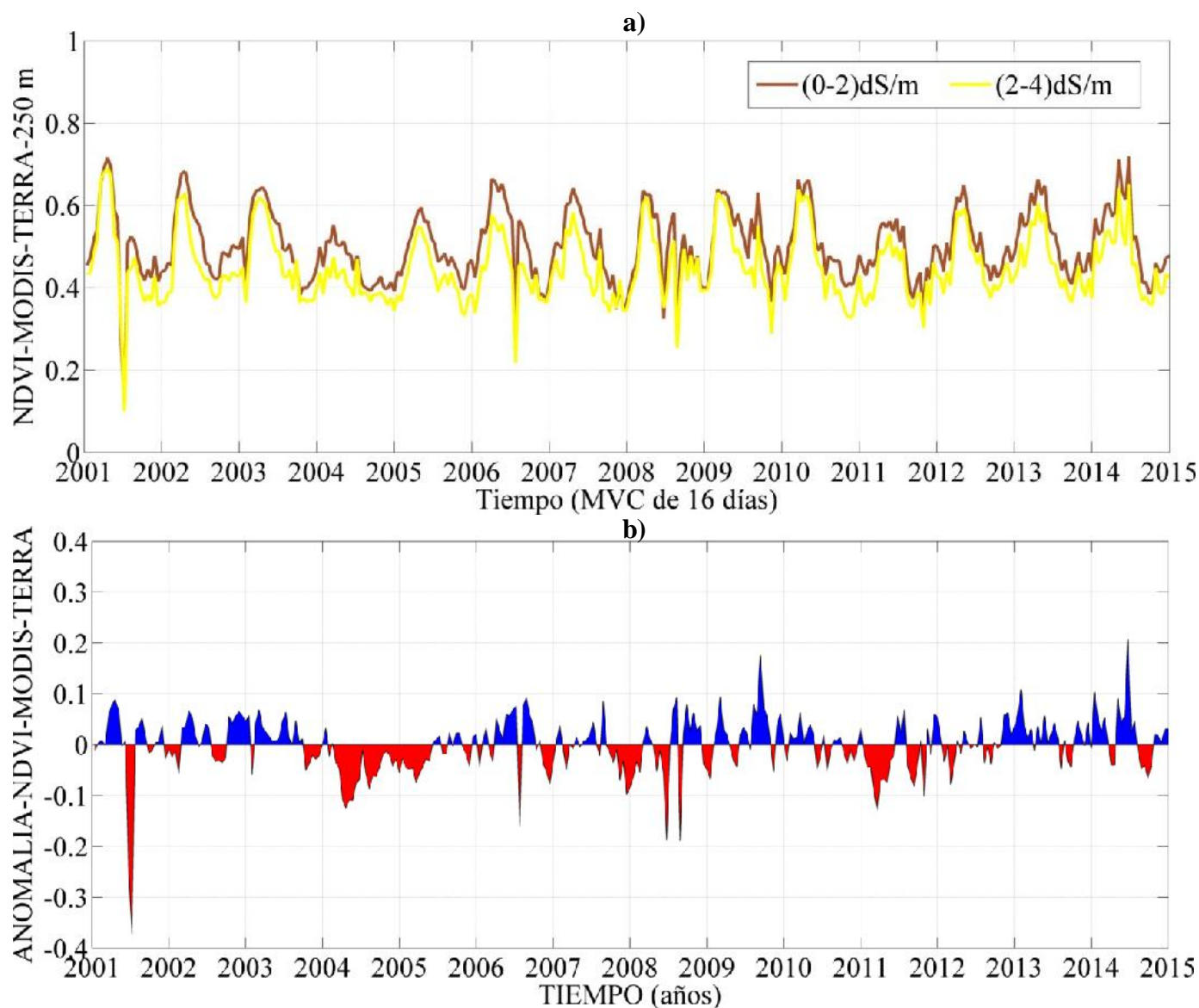
La serie temporal de valores promedio del NDVI para las clases marrón y amarillo del mapa “A”, se presentan en la Figura 5.32a. Esta serie temporal muestra la estacionalidad del cultivo de arroz, con una baja amplitud de variación del NDVI.



**Figura 5. 31.** Mapa de CE del suelo del distrito de Pícsi “A” de fecha 20 de noviembre del 2007, imagen del sensor ETM+ LandSat-7. Mapa de desviación estándar “B” obtenido a partir de 25 imágenes del NDVI, sensor ETM+ LandSat-7 del periodo 2001-2014.

Fuente: Elaboración propia.





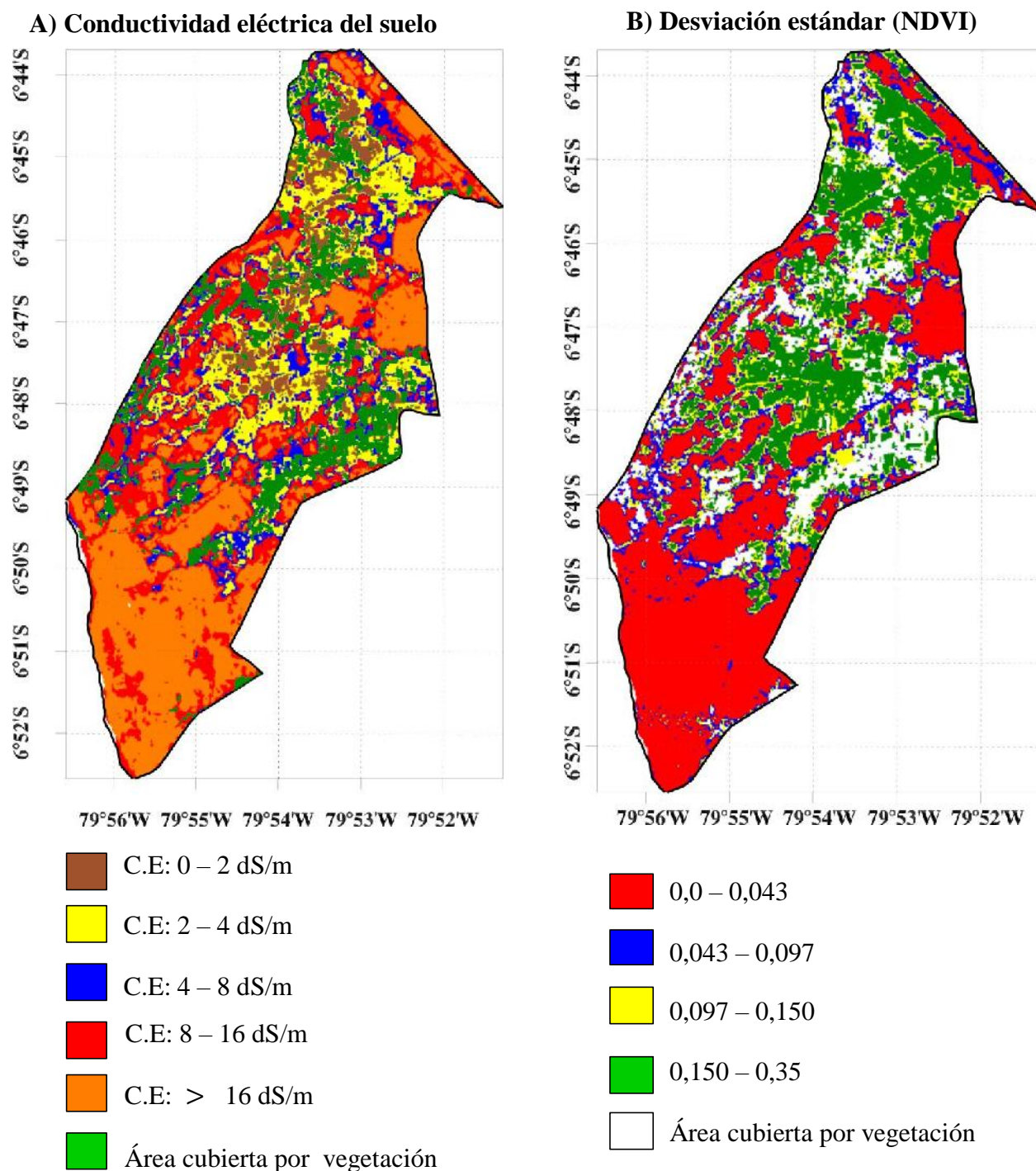
**Figura 5. 32.** Serie temporal promedio del NDVI “a”, correspondiente a las áreas con valores de CE del suelo comprendido entre [0 – 4] dS/m. En “b” se muestra la serie temporal de la anomalía del NDVI determinada en el distrito de Picsi durante el periodo 2001-2014.

Fuente: Elaboración propia.

### **Distrito de Pimentel**

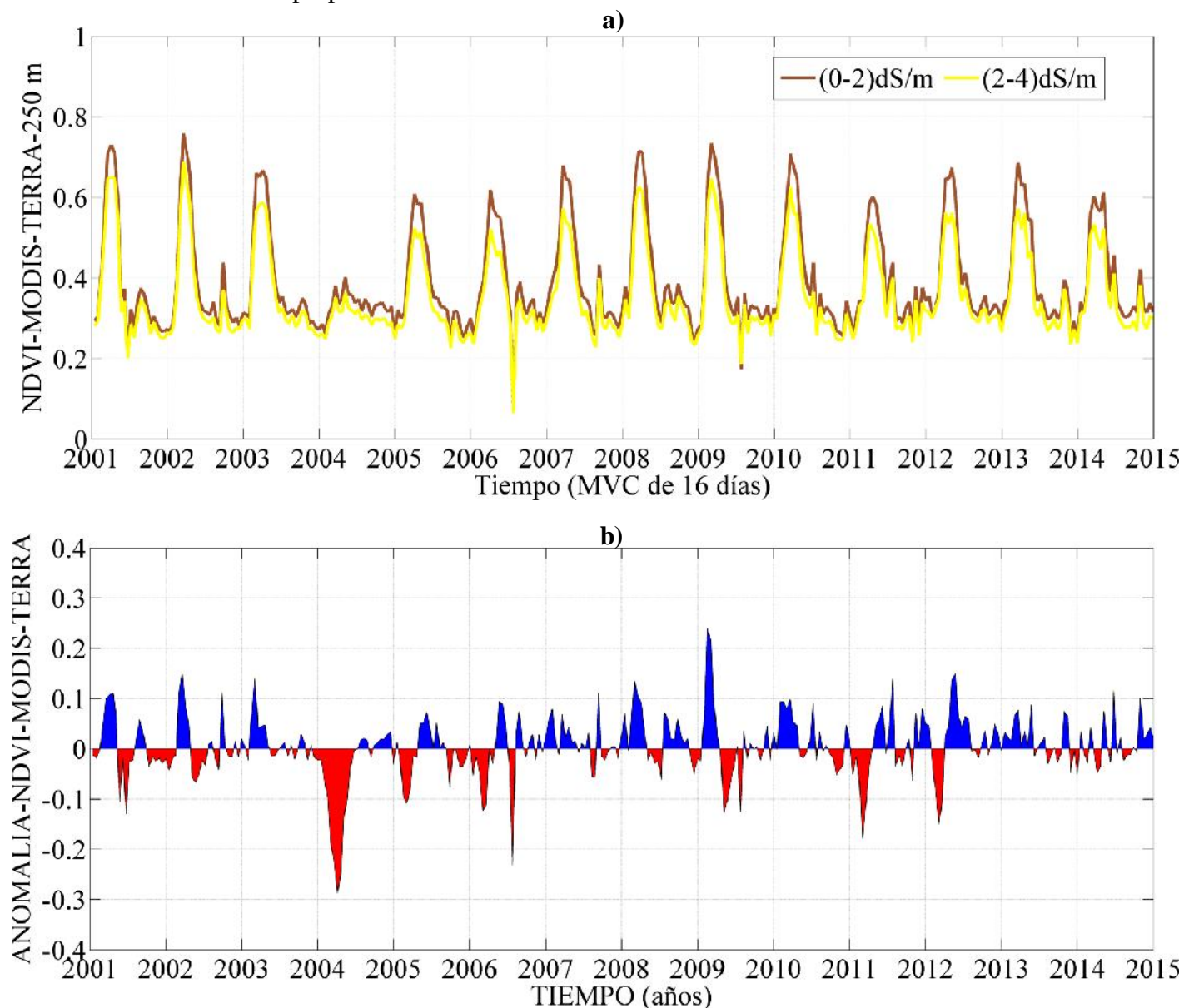
El distrito de Pimentel presenta aproximadamente 1 511,46 ha pertenecientes a las clases marrón y amarillo del mapa “A”, áreas que pertenecen a cultivos de arroz. 1 491,93 ha pertenecientes a la clase de color verde del mapa “B”, que corresponde a la desviación estándar

del NDVI, siendo esta, la clase que mayor variación presentó sobre su superficie durante el periodo 2001-2014. La Figura 5.34a muestra la variación temporal del NDVI de las clases marrón y amarillo de la Figura 5.33A, esta serie muestra la estacionalidad de los cultivos de arroz sembrados en dichas áreas.



**Figura 5. 33.** Mapa de CE del suelo del distrito de Pimentel “A” de fecha 20 de noviembre del 2007, imagen del sensor ETM+ LandSat-7. Mapa de desviación estándar “B” obtenido a partir de 25 imágenes del NDVI, sensor ETM+ LandSat-7 del periodo 2001-2014.

Fuente: Elaboración propia.



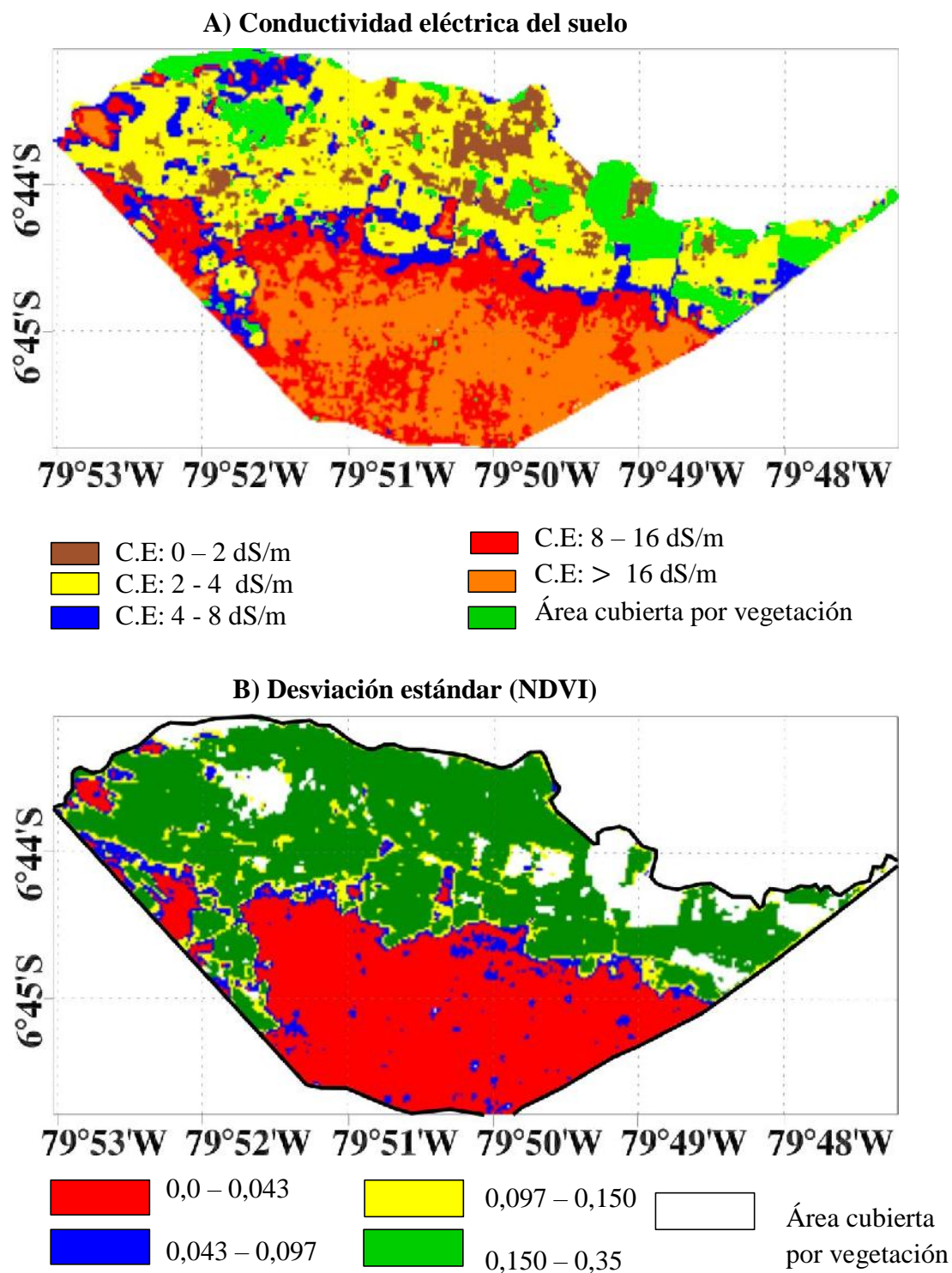
**Figura 5. 34.** Serie temporal promedio del NDVI “a”, correspondiente a las áreas con valores de CE del suelo comprendido entre [0 – 4] dS/m. Serie temporal de la anomalía del NDVI “b” determinada en el distrito de Pimentel durante el periodo 2001-2014.

Fuente: Elaboración propia.

**Distrito de José Leonardo Ortiz**



Es el distrito con mayor expansión urbana ocupando áreas de cultivo durante todos los años.

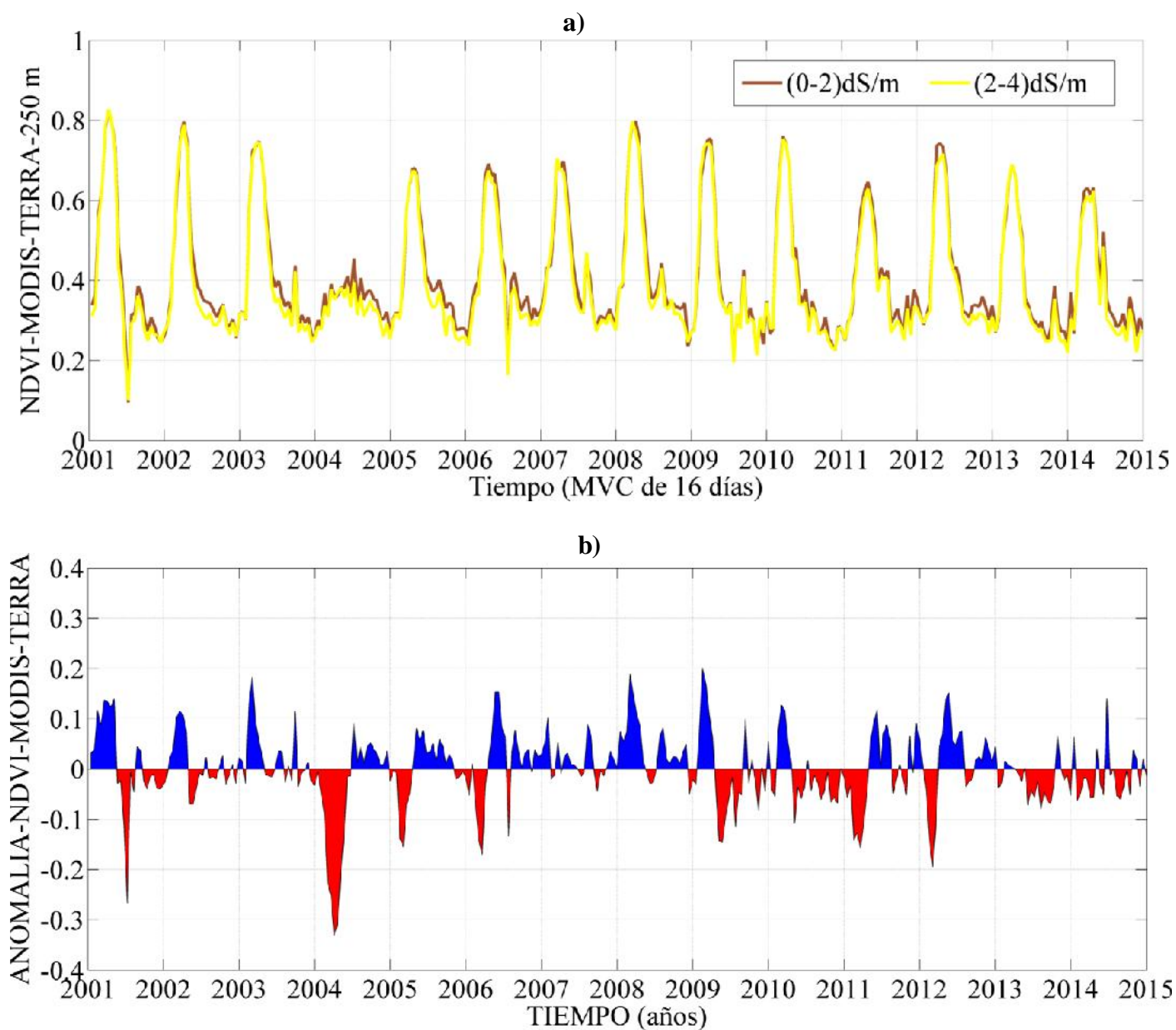


**Figura 5. 35.** Mapa de CE del suelo del distrito de José Leonardo Ortiz “A” de fecha 20 de noviembre del 2007, imagen del sensor ETM+ LandSat-7. Mapa de desviación estándar “B”



obtenido a partir de 25 imágenes del NDVI, sensor ETM+ LandSat-7 del periodo 2001-2014.

Fuente: Elaboración propia.



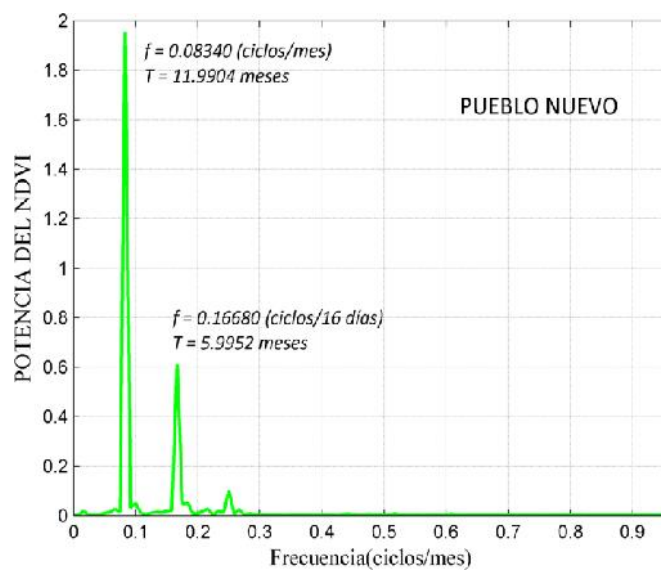
**Figura 5. 36.** Serie temporal promedio del NDVI “a”, correspondiente a las áreas con valores de CE del suelo comprendido entre [0 – 4] dS/m. Serie temporal de la anomalía del NDVI “b” determinada en el distrito de Pimentel durante el periodo 2001-2014.

Fuente: Elaboración propia.

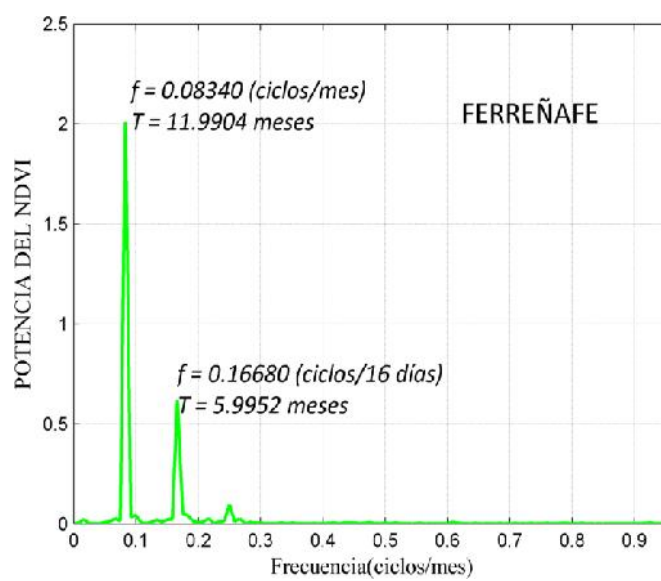
La superficie, con una conductividad eléctrica del suelo entre 0 - 4 dS/m, es aproximadamente 1 116,0 ha, correspondiente a las clases marrón y amarillo de la Figura 5.35A. Para la Figura 5.35B que representa la desviación estándar del NDVI, la clase de color verde representa las áreas de mayor variabilidad (mayor cambio de la cobertura del suelo durante el periodo 2001-2014) del NDVI en la superficie del suelo, que representa 1 257,21 ha aproximadamente que corresponden a cultivos de arroz dentro del distrito de José Leonardo Ortiz. La serie temporal de valores promedio del NDVI del sensor MODIS para las clases marrón y amarillo obtenido del mapa “A”, presentada en la Figura 5.35A, ayuda a demostrar mediante la estacionalidad de la serie temporal del NDVI, la existencia de cultivos de arroz en cada año durante el periodo 2001 - 2014. La consistencia observada en la serie temporal de los valores del NDVI (Figura 5.36a) muestra la estacionalidad de los cultivos de arroz.

Se obtuvo la serie temporal de anomalías del NDVI durante el periodo 2001-2014, para cada uno de los distritos. Estas series se muestran en las Figuras 5.24b, 5.26b, 5.28b, 5.30b, 5.32b, 5.34b y 5.36b. Donde se observan dos anomalías muy significativas correspondientes a los eventos de sequía regional (*Guerrero, 2015*) ocurrido en los años 2004 y 2011, que afectaron en forma considerable los cultivos de arroz generando pérdidas económicas muy significativas en el sector agrario de esta parte de la Costa Norte del Perú.

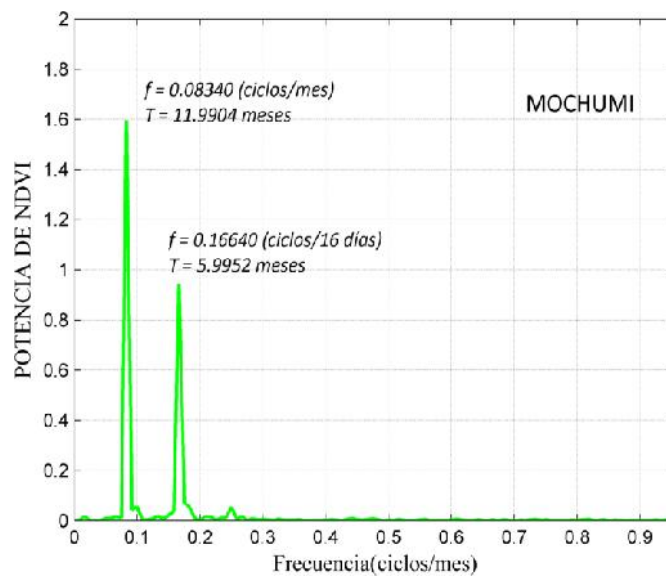
a)



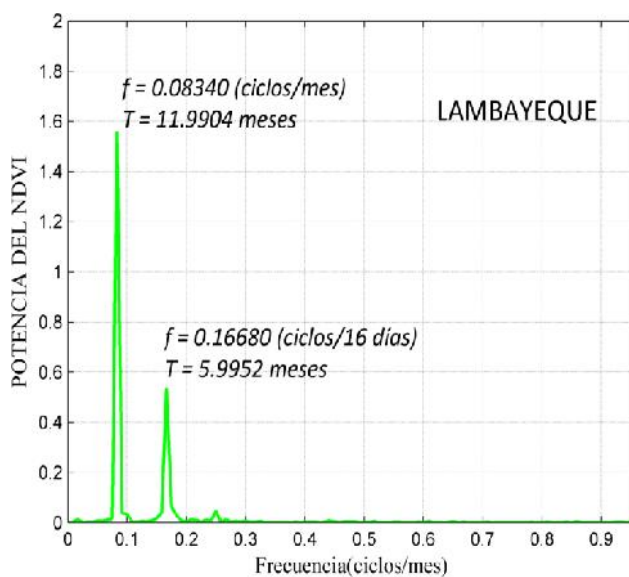
b)



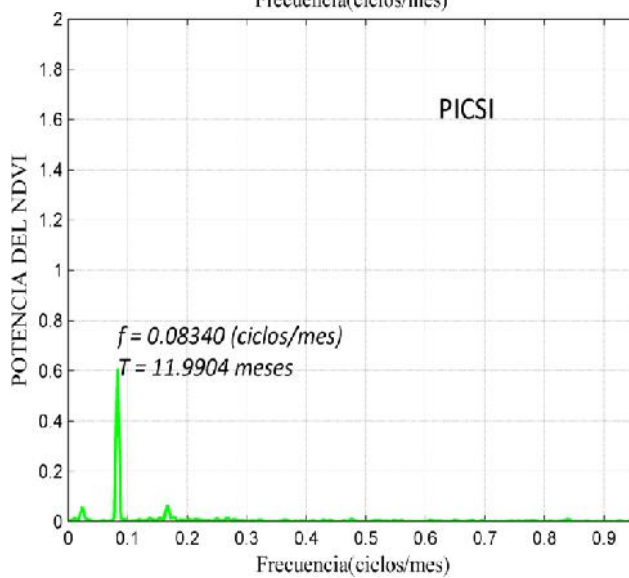
c)



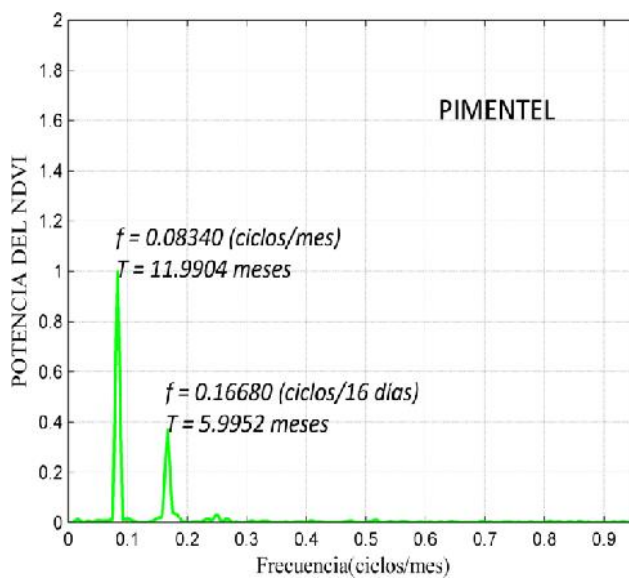
d)



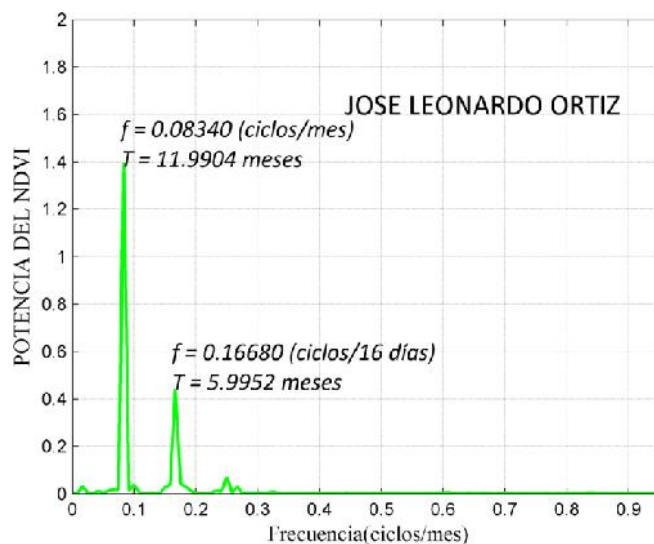
e)



f)



g)



**Figura 5. 37.** Espectros de frecuencias obtenidos de las series temporales de los siete distritos mostrados en las Figuras 5.24a, 5.26a, 5.28a, 5.30a, 5.32a, 5.34a y 5.36a. El periodo es exactamente el mismo para cada una de estas series.

Fuente: Elaboración propia.

Los espectros de potencia de las siete series de tiempo del NDVI de cultivos de arroz mostrados en las Figuras 5.24a, 5.26a, 5.28a, 5.30a, 5.32a, 5.34a y 5.36a evidencia similar composición espectral. El espectro de potencia para el distrito de Ferreñafe muestra el mayor valor de energía que es consistente a la gran amplitud observada en los valores cada 16 días (Figura 5.28 a, mayor amplitud de variación). La composición espectral para el distrito de Picsi, muestra el menor valor de energía en comparación a la de otros distritos, que es consistente a lo observado en los valores de NDVI de la serie temporal (Figura 5.32 a, menor amplitud de variación). Los espectros muestran una gran acumulación de energía en la banda de 12 meses y una pequeña en la banda de 6 meses. Esto indica que los cultivos de arroz sólo se presentan una sola vez en 12 meses, como se observa los picos del NDVI de la serie temporal (Figuras 5.24a – 5.36a).

### 5.10. Análisis estadístico de las áreas obtenidas mediante los valores de conductividad eléctrica del suelo, desviación estándar y datos de campo del Ministerio de Agricultura

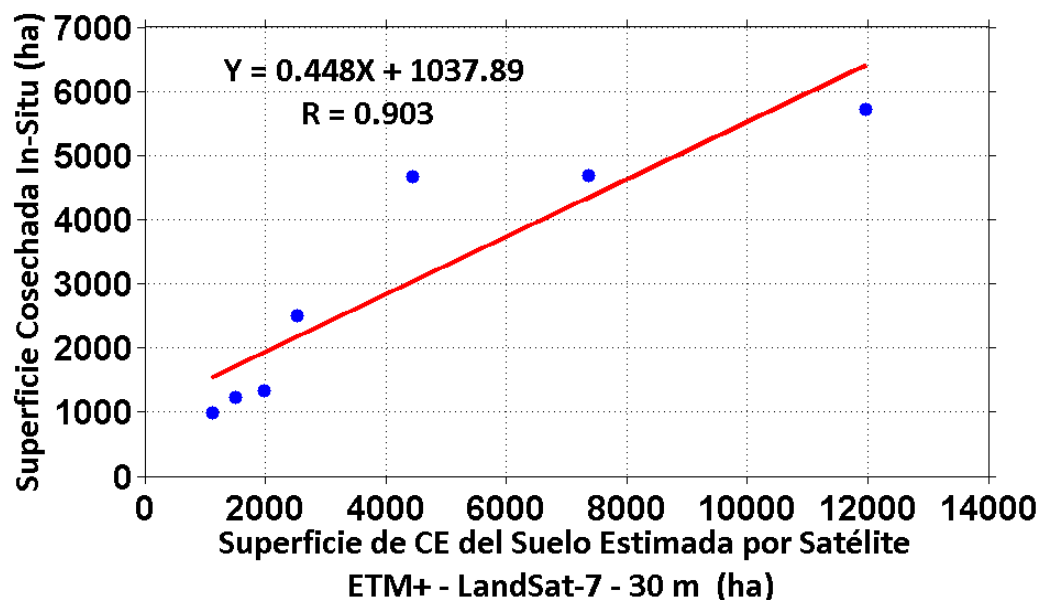
A partir de los análisis estadísticos de: desviación estándar, modelos de correlación lineal simple y múltiple, se obtuvo las áreas que presentan una máxima variabilidad en la cobertura del suelo, detectadas mediante el análisis estadístico de desviación estándar del NDVI y las áreas obtenidas mediante el análisis estadístico de correlación lineal múltiple entre conductividad eléctrica y reflectancia espectral del suelo. Las áreas obtenidas se muestran en la Tabla 5.4. Las Figuras 5.38 y 5.39, muestran el grado de relación que existe entre las superficies de cultivos de arroz estimadas por imágenes satelitales frente a las superficies de cultivos de arroz medidas in-situ por el MINAGRI, y estas presentan un coeficiente de correlación (R) mayor a 0,90. Esto demuestra que las imágenes satelitales son una muy buena opción para detectar cultivos de arroz a escala regional y local. La Figura 5.40 muestra el grado de relación que existe entre las dos metodologías empleadas (desviación estándar del NDVI y CE del suelo) para la detección de cultivos de arroz usando imágenes satelitales, presentando un coeficiente de correlación lineal positivo muy bueno de  $R = 0,999$ .

**Tabla 5. 4.**

*Superficie de cultivos de arroz estimada por satélite, mediante la CE del suelo, desviación estándar. Datos In-Situ de superficie cosechada de cultivos de arroz.*

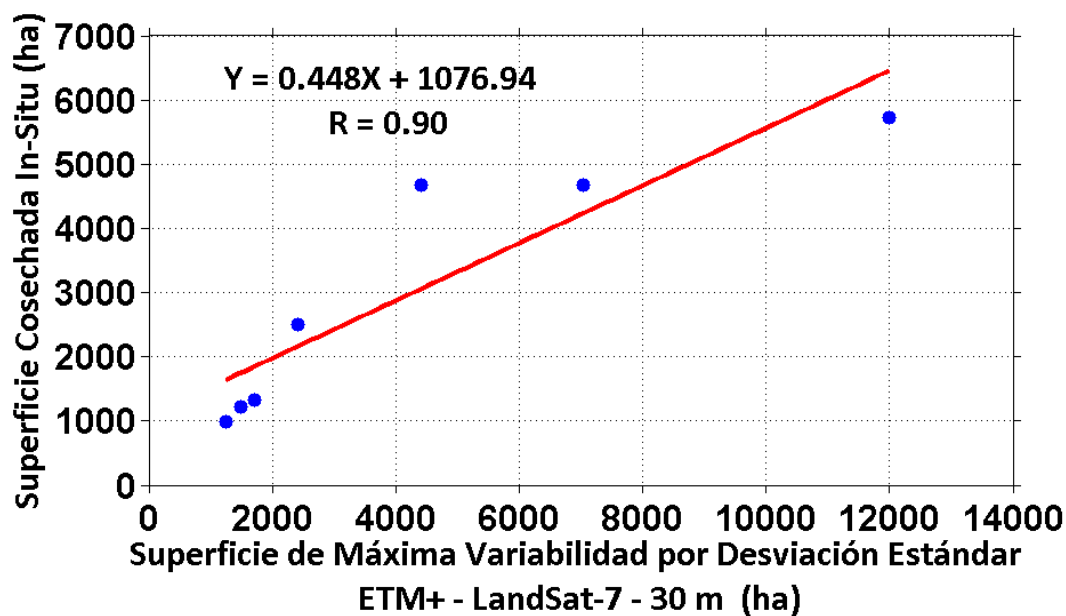
Distrito	Área de CE del suelo 0 - 4 dS/m (ha) 2007	Área de la desviación estándar (ha)	Datos del MINAGRI 2007 (ha)
Lambayeque	11 969,64	11 987,37	5 726
Ferreñafe	4 437,90	4 418,73	4 675
Mochumí	7 366,14	7 030,44	4 680
Pueblo Nuevo	2 521,26	2 406,15	2 500
Picsi	1 985,13	1 710,45	1330
Pimentel	1 511,46	1 491,93	1 226
José Leonardo Ortiz	1 116,00	1 257,21	983

Fuente: Elaboración propia.



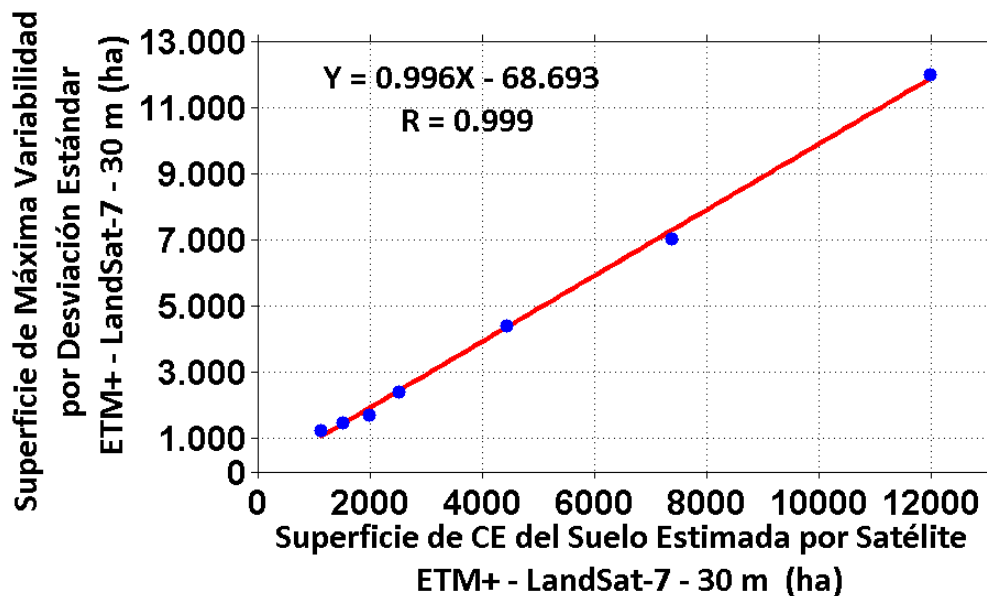
**Figura 5. 38.** Gráfico de dispersión entre las superficies de cultivos de arroz, estimada por satélite (sensor ETM+ LandSat-7) usando datos de CE del suelo y datos in-situ de superficie cosechada, teniendo en cuenta los valores en la Tabla 4.7 y la Figura 5.17. El rango de CE del suelo para el área estimada es: 0 - 4 dS/m.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5. 39.** Gráfico de dispersión entre las superficies de cultivos de arroz, estimada por satélite (sensor ETM+ LandSat-7) mediante la desviación estándar y datos in-situ de superficie cosechada, teniendo en cuenta los valores de la clase color verde en la Figura 5.15.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5. 40.** Gráfico de dispersión entre las superficies de cultivos de arroz, estimada por satélite mediante la desviación estándar y CE del suelo (sensor ETM+ LandSat-7).

Fuente: Elaboración propia.

### 5.11. Modelo de un sistema operacional de la variación temporal y espacial de las áreas de cultivos de arroz

Para la detección de áreas de cultivos de arroz en el tiempo, se establece el siguiente modelo operacional.

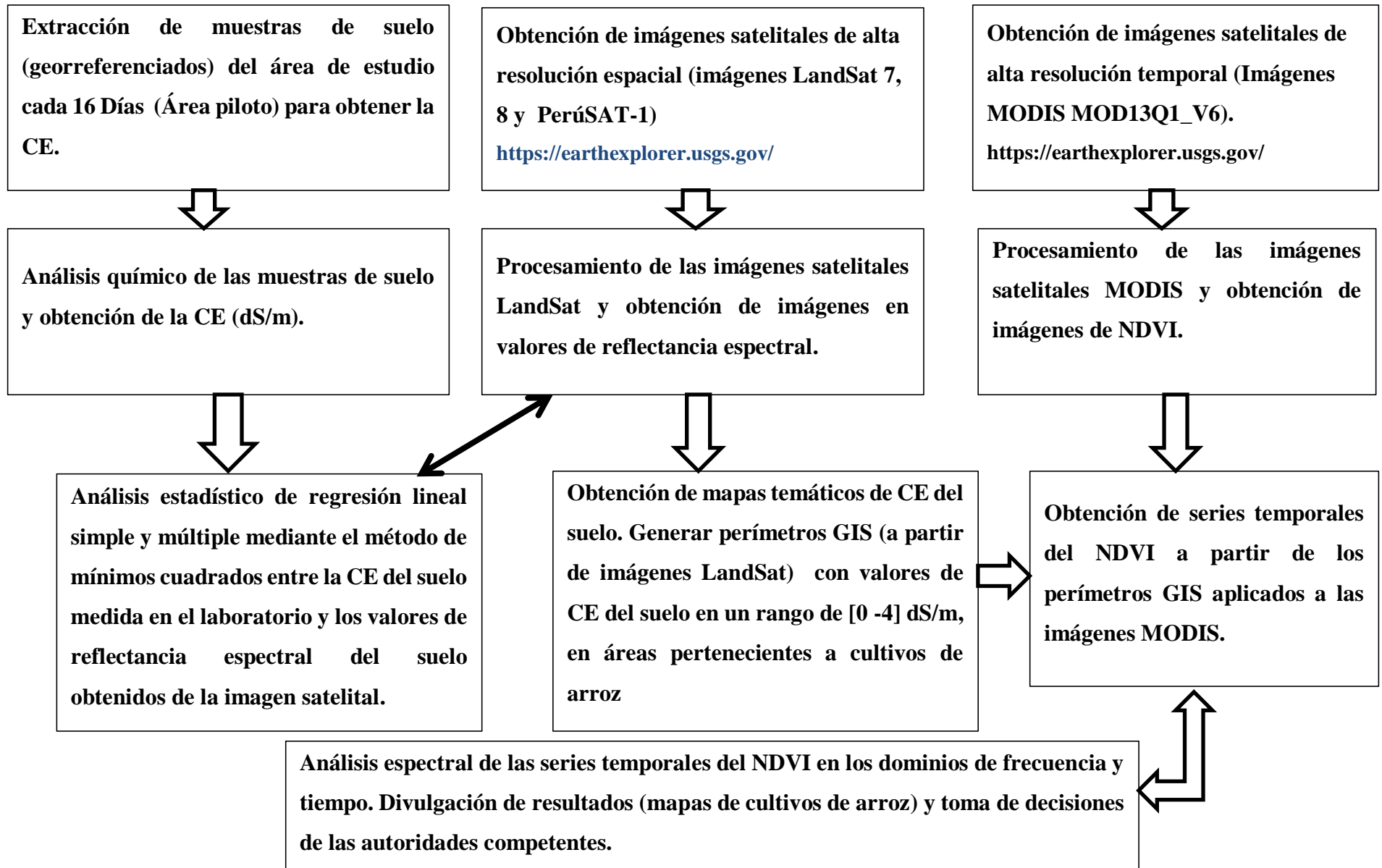
#### 5.11.1. Modelo operacional de vigilancia

Un modelo operacional asegura la implementación efectiva de procesos de planificación de estudio de las áreas de cultivos de arroz, es un modelo dinámico, donde existen planificaciones para cada elemento: Recolección de muestras de suelo (CE), obtención de imágenes satelitales de alta resolución espacial y temporal, procesos y aplicaciones de software, análisis estadístico mediante el método de mínimos cuadrados, Análisis espectral en el dominio de frecuencia y tiempo de series temporales del NDVI, toma de decisiones.



Las muestras de suelo deben pertenecer a un área estudio piloto y deben tener un rango temporal de muestreo de 16 días al igual que la resolución temporal de las imágenes satelitales, como se establece en la Figura 5.41.

Los modelos operacionales reflejan una estructura compleja, heurística, similar a una red, la planificación de los procesos rara vez se desarrollan como un conjunto de etapas lineales. Las retroalimentaciones (lineales discontinuas) son típicamente necesarias entre etapas para garantizar la efectividad de los procesos entre cada etapa y obtener un resultado óptimo de acuerdo a la realidad [19].



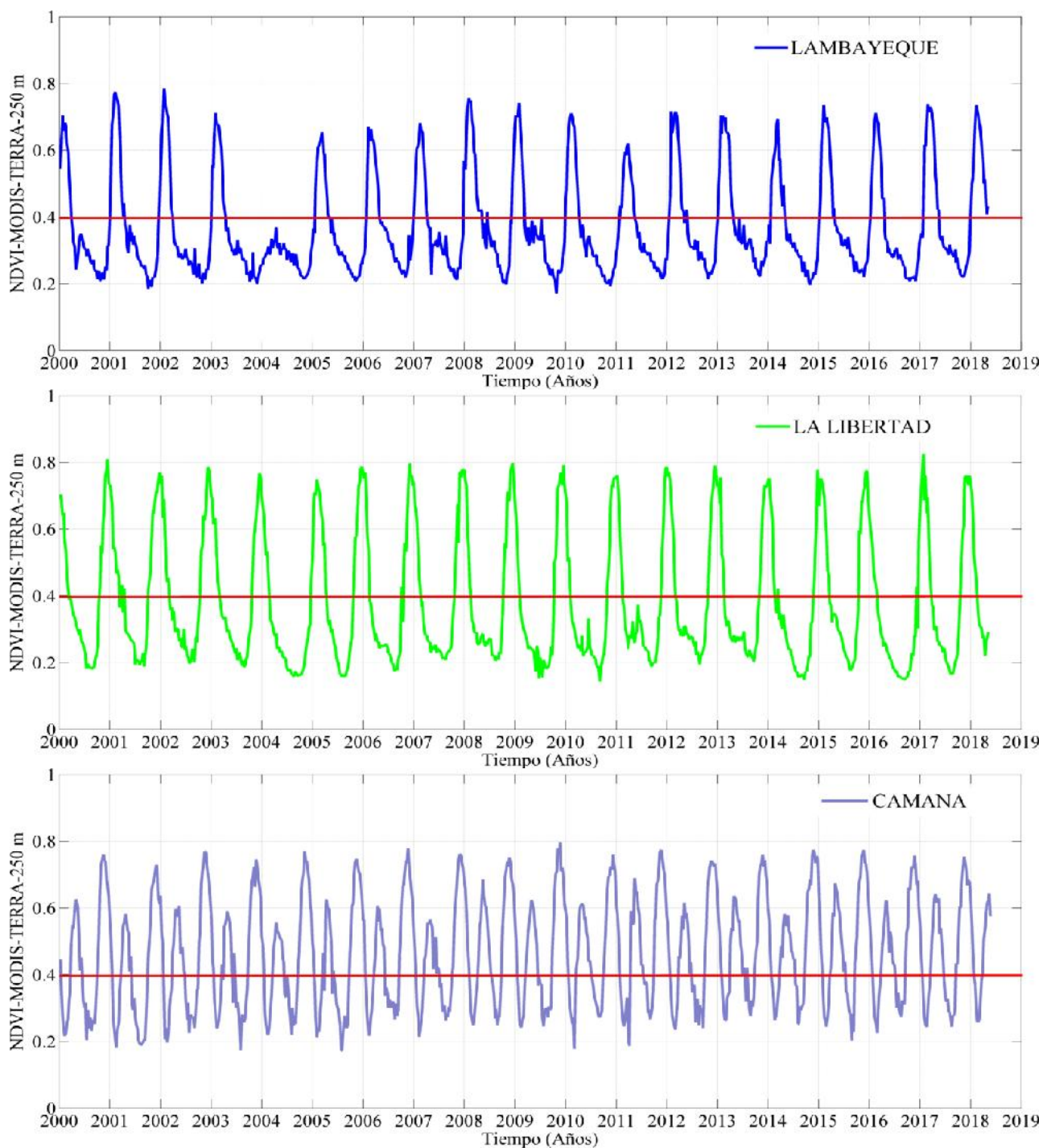
**Figura 5. 41.** Modelo operacional de detección de cultivos de arroz en la Cuenca Chancay Lambayeque, Intercuenca 137771.

Fuente: Elaboración propia.

### **5.12. Sensibilidad de los cultivos de arroz relacionados a la sequía en la costa norte**

La costa peruana es una región árida, donde la escasez de lluvias es aproximadamente nula durante todo el año. Los eventos de sequías, están sujetos a la falta de precipitación y una elevada evapotranspiración generando un impacto agrícola. Estos eventos son frecuentes en regiones con estas características, y uno de los parámetros más importantes y sensibles a la falta de agua es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) [10]. En la Figura 5.42 se muestran las series temporales del NDVI de cultivos de arroz de tres regiones de la costa peruana. Se observa que los eventos de sequía ocurridos en la costa norte del Perú (Lambayeque) que afectaron seriamente la siembra de cultivos de arroz en esta región, no tuvo ningún efecto anómalo en las regiones de La Libertad y Arequipa, desarrollándose con total normalidad la siembra de los cultivos de arroz tal como se observa en las series temporales del NDVI, donde la consistencia de la variación en amplitud del NDVI es muy alta.

Esto demuestra que el NDVI es un parámetro muy útil para el monitoreo de la vegetación. Mide la abundancia y vigor de la presencia de vegetación, y a largo plazo, suministra información importante del comportamiento estacional de la vegetación (cultivos). Esta información es fundamental para comprender la respuesta de la vegetación ante las variaciones climáticas (sequía).



**Figura 5. 42.** Series temporales del NDVI de cultivos de arroz de las regiones Lambayeque, La Libertad y Arequipa. Se muestra que los eventos de sequía ocurridos en los años 2004 y 2011 en la costa norte del Perú, corresponden a eventos de sequía regionales.

Fuente: Elaboración propia.

## **VI. Conclusiones y recomendaciones**

### **6.1. Conclusiones**

Del análisis realizado en esta investigación se concluye:

1. La metodología desarrollada cumplió con los objetivos de detectar y cuantificar la variabilidad de los cultivos de arroz en el espacio y tiempo en la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771.
2. Las imágenes del sensor ETM+ a bordo del satélite LanSat-7 de alta resolución espacial, permitió obtener información de la superficie del sub-suelo relacionado a la conductividad eléctrica del suelo.
3. El NDVI es un parámetro biofísico confiable, para el estudio de los cultivos de arroz. Mediante este, se visualizó la dinámica de los cultivos de arroz durante el periodo 2001 – 2014. La técnica del máximo valor compuesto de imágenes del NDVI (2001-2014) ayudó a identificar a un rango de 0,68 - 1 NDVI, las áreas de buena producción de arroz aproximadamente de 40 831,01 ha, y suelos con baja calidad agrícola pertenecientes a caminos, canales, cerros y ciudades con valores inferiores a 0,68 NDVI.
4. Las imágenes producto del NDVI del sensor MODIS de alta resolución temporal de 16 días, permitió obtener información del comportamiento del estado de salud de la cobertura vegetal de los cultivos de arroz en el espacio y tiempo durante el periodo 2001-2014.
5. La metodología para identificar los cultivos de arroz mediante la desviación estándar resultó ser muy eficiente. Permitió localizar aquellas áreas donde los cambios físicos sobre la superficie son muy fuertes, producto de la siembra de los cultivos de arroz. Su obtención fue a partir de 25 imágenes de NDVI del sensor ETM+ durante el periodo 2001-2014. Se obtuvo un área aproximadamente de 42 218,82 ha pertenecientes a cultivos de arroz.

6. La variación estacional del NDVI en el tiempo de imágenes MODIS, permitió visualizar y comprobar la dinámica de los cultivos de arroz en áreas detectados mediante la desviación estándar del NDVI.
7. Los modelos estadísticos de regresión lineal simple y múltiple a través del método de mínimos cuadrados elaborados para estimar la CE del suelo, haciendo uso de la reflectancia espectral de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 (del sensor ETM+ a bordo del satélite LandSat-7 de fecha 20/11/2007) frente a los valores de conductividad eléctrica del suelo (18/10/2007) medidas en el Laboratorio de suelos de la UNPRG, que presentaron coeficientes de correlación de alta significancia para todas las bandas, siendo las bandas del visible B1 (azul), B2 (verde), B3 (rojo) y B4 (infrarrojo cercano) las de mayor relación con la conductividad eléctrica del suelo. Los modelos de regresión lineal múltiple mediante el método de mínimos cuadrados, presentan coeficientes de correlación similares, siendo la ecuación:  **$CE = 137,61x B1 + 58,93x B2 - 76,96x B3 + 40,95x B4 - 12,93$**  de la Tabla 5.3 con mayor coeficiente de correlación (R=0,81). Esta ecuación se utilizó para obtener la distribución espacial de la conductividad eléctrica del suelo en la cuenca Chancay-Lambayeque, intercuenca 137771.
8. El mapa temático de conductividad eléctrica del suelo generado por el modelo de regresión lineal múltiple, muestra la conductividad eléctrica del suelo de los cultivos de arroz. Se determinó 5 clases y con ello el perímetro GIS de cada una. Lo que permitió realizar un análisis de la variación temporal del NDVI, usando imágenes del NDVI del sensor MODIS. En la serie temporal se observa, que en los suelos con baja conductividad eléctrica (0-2 dS/m) se instaló cultivos de arroz durante todos los años, mostrando altos valores estacionales de NDVI (0,8), y estos disminuyen para los suelos con una conductividad eléctrica de 2 - 4 dS/m. No se instaló

cultivos de arroz en las otras clases de suelos, esto porque los valores de NDVI no sobrepasan el valor de 0,4 en la serie temporal.

9. El área de cultivo de arroz, detectado con la metodología de la conductividad eléctrica del suelo es de aproximadamente 44 028,76 ha, en un rango de conductividad eléctrica de 0 - 4 dS/m. La producción de los cultivos de arroz en suelos con estos valores de CE es muy buena.

## **6.2. Recomendaciones**

1. La extracción de las muestra de suelo se debe realizar durante todo el periodo de producción del cultivo de arroz, siguiendo la resolución temporal de sensor MODIS y ETM+, en un mismo punto.
2. La extracción de las muestra de suelo, en las áreas de cultivo de arroz se debe de realizar en un perfil de 0 - 1 m de profundidad variando la profundidad en un rango de 0,10m para cada muestra.
3. Para detectar cultivos de arroz, se debe utilizar otras variables como: Evapotranspiración, Temperatura, índice de Agua etc., usando imágenes de muy alta resolución espacial y temporal.

## **VII. Referencias bibliográficas**

- [1] Badaracco Meza, R. R. Detección de la Salinidad en los suelos de Cultivos de Algodón usando Imágenes de Satélite en la Costa Norte del Perú, Tesis de Licenciatura para optar

el título de Licenciado en Física, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú. 2012.

- [2] Bai, Z. G., D. L. Dent, H. Bartholomeus and M. E. Schaepman, Assessing land degradation and improvement using NASA GIMMS, Shaanxi, China, Remote sensing and geoinformation processing in the assessment and monitoring of land degradation and desertification, Trier, Germany, pp. 128-135. 2005.
- [3] Berk A, Bernstein L .MODTRAN Cloud and Multiple Scattering Upgrades with Application to AVIRIS. 1999.
- [4] Chander G, Markham G, and Helder D. Sumary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ , and EO-1 ALI Sensors ,Remote Sensing of Environment. 2009.
- [5] Chuvieco E.Teledetección Ambiental .Madrid – España. 2002.
- [6] Kumar F. Nand. Mineral nutrition of rice. New York, CRC Press, Taylor & Francis Group. 2014.
- [7] Felicísimo, A. M. Modelos digitales del terreno: principios y aplicaciones en las ciencias ambientales. Oviedo, España: Pentalfa Ediciones. pp. 222, ISBN: 84-7848-475-2. 1994.
- [8] Frulla, L. "Perturbaciones introducidas por la atmósfera y la superficie terrestre en las bandas ópticas de la radiación electromagnética solar. Su importancia en la teledetección." Laura Frulla. Tesis doctoral, Dto. De Física de la UBA. 1992.
- [9] Gates D, Keegan H. Spectral properties of plants, Applied Optics. 1965.
- [10] Guerrero S .J. Investigación de la climatología de la humedad atmosférica y su relación con la sequía en la costa Peruana utilizando imágenes de satélite del sensor MODIS



- /TERRA, Tesis para optar el grado académico de magister en física con mención en Geofísica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima – Perú. 2015.
- [11] Grattan R, Shannon S .Rice is more sensitive to salinity than previously thought .USDA-ARS, USA. 2002.
- [12] Huete A, Didan K .Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetación índices .Remote Sens. 2002.
- [13] Inoue Y, Peñuelas J .Normalized difference spectral índices for estimating photosynthetic efficiency and capacity at a canopy scale derived from hyperspectral and  $CO_2$  flux measurements in rice .Remote Sensing of Environment. 2008.
- [14] John David Jackson, classical electrodynamics, third edition, Berkeley, California EE.UU. 1999.
- [15] Lee, Teang Shui., 2012. Irrigation Systems and Practices in Challenging Environments. In Tech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia.
- [16] Lira, J. y Oliver, A., A. diffusion model to correct multi-spectral images for the path—radiance atmospheric effect. Mexico D. F. pp. 55-57. 1983.
- [17] Núñez J. Estudio Geo ambiental de la cuenca del Rio Chancay – Lambayeque .INGEMET, Lima-Perú, UNMSM.2006.
- [18] OIA., Arroz en cifras, revista del ministerio de agricultura del Perú, Lima-Perú, UNMSM, pp. 1-5. 2000.
- [19] Pierce, S. M., R. M. Cowling, A. T. Knight, A.T. Lombard, M. Rouget, and T. Wolf. 2005. Systematic conservation assessment products for landuse planning: interpolation for implementation biological conservation 125: 441-548.

- [20] Richards, L. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils .United States Salinity Laboratory Staff, Agriculture Handbook. 1954.
- [21] Rhoades, J. D, Chanduvi, F, Lesch, S. Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements, FAO irrigation and drainage paper, pp. 57. 1999.
- [22] Rojas, A. J. y E. Rufasto C. Relación de la conductividad eléctrica de los suelos con la reflectancia de imágenes de satélite en la Región de Lambayeque-Perú. Revista de Investigación de Física, UNMSM. 14, 111402402. 2011.
- [23] Sahoo R, Ray N. Hyperspectral remote sensing of agricultura. Current Science .2015.
- [24] Sobrino, J.A. Teledetección .España .Servicios de publicaciones, UNIVERSIDAD DE VALENCIA. 2000.
- [25] Soca F. Identificación de tierras degradadas por salinidad del suelo en los cultivos de Caña de azúcar en Pomalca usando imágenes de satélite, Tesis para optar el grado de Magister con mención en Geofísica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2015.
- [26] Thomas E, Stamnes K.”Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean”, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1999.
- [27] Ting-Ting Zhang, Jia-Guo Qi, Yu Gao, Zu-Tao Ouyang. 2015. Detecting soil salinity with MODIS time series VI data, Shanghai 200090, PR China. Ecological Indicators. pp. 480–489.
- [28] Torres G. La desertificación en el Perú .Cuarta comunicación Nacional del Perú a la Convención de Lucha contra la Desertificación y la Sequía. Ministerio del Medio Ambiente, editorial Comercio.2011

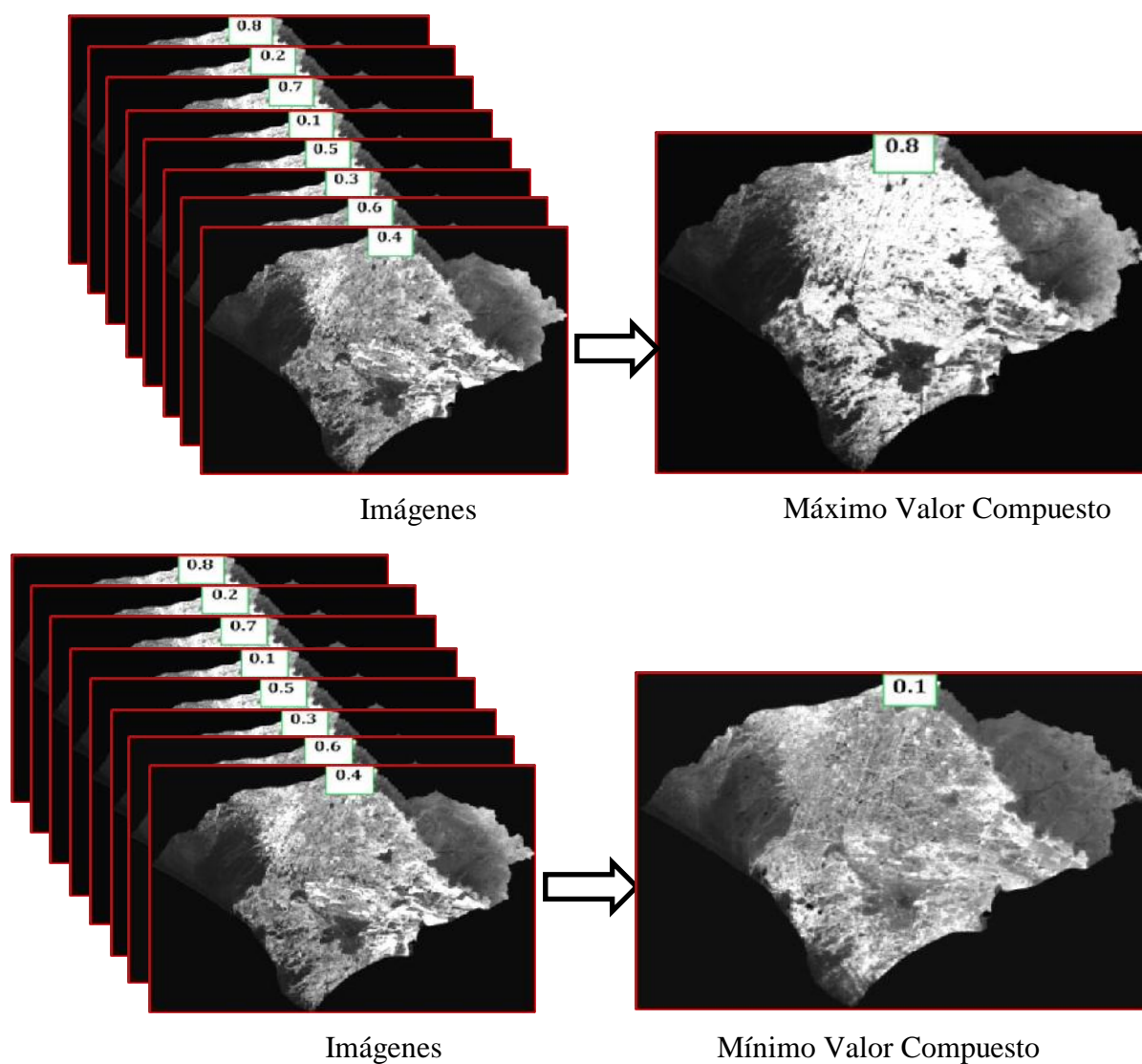
- [29] Udelhoven, Thomas. User Manual TimeStats. Département Environnement et Agro-Biotechnologies. 41, rue du Brill. L-4422 Belvaux. Luxembourg, V1.0, 1-64. 2005.
- [30] Williams D .Landsat – 7 Science Data Users Handbook, Acquired [http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook\\_toc.html](http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook_toc.html), National Aeronautics and Space Administración, 2004.
- [31] White D. The MODIS Conversión Toolkit (MCTK): Users Guide, 2009.
- [32] Jeroen Vos, Linden Vincent, 2010. Volumetric wáter control in a large-scale open canal irrigation system with many smallholders: The case of Chancay- Lambayeque in Perú. Irrigation and Water Engineering Group, Centre for Water and Climate, Wageningen University, Droevendaalsesteeg 3a, 6708 PB Wageningen, The Netherlands. ELSEVIER, pp.

## VIII. Anexos

### Anexo A. Máximo Valor Compuesto y Mínimo Valor Compuesto de imágenes

La Técnica del Máximo Valor Compuesto (MVC) y Mínimo Valor Compuesto consiste en seleccionar el mayor y menor valor numérico en un pixel determinado en diferentes fechas [2]

dentro de un conjunto de imágenes, obteniéndose como resultado una imagen de Máximo Valor Compuesto o Mínimo Valor Compuesto. Esto es posible con ayuda de un programa realizado en el lenguaje de programación IDL. La Figura A.1. Se presenta un ejemplo para los dos casos.



**Figura A. 1.** Ejemplos para obtener el máximo y mínimo valor compuesto en imágenes.

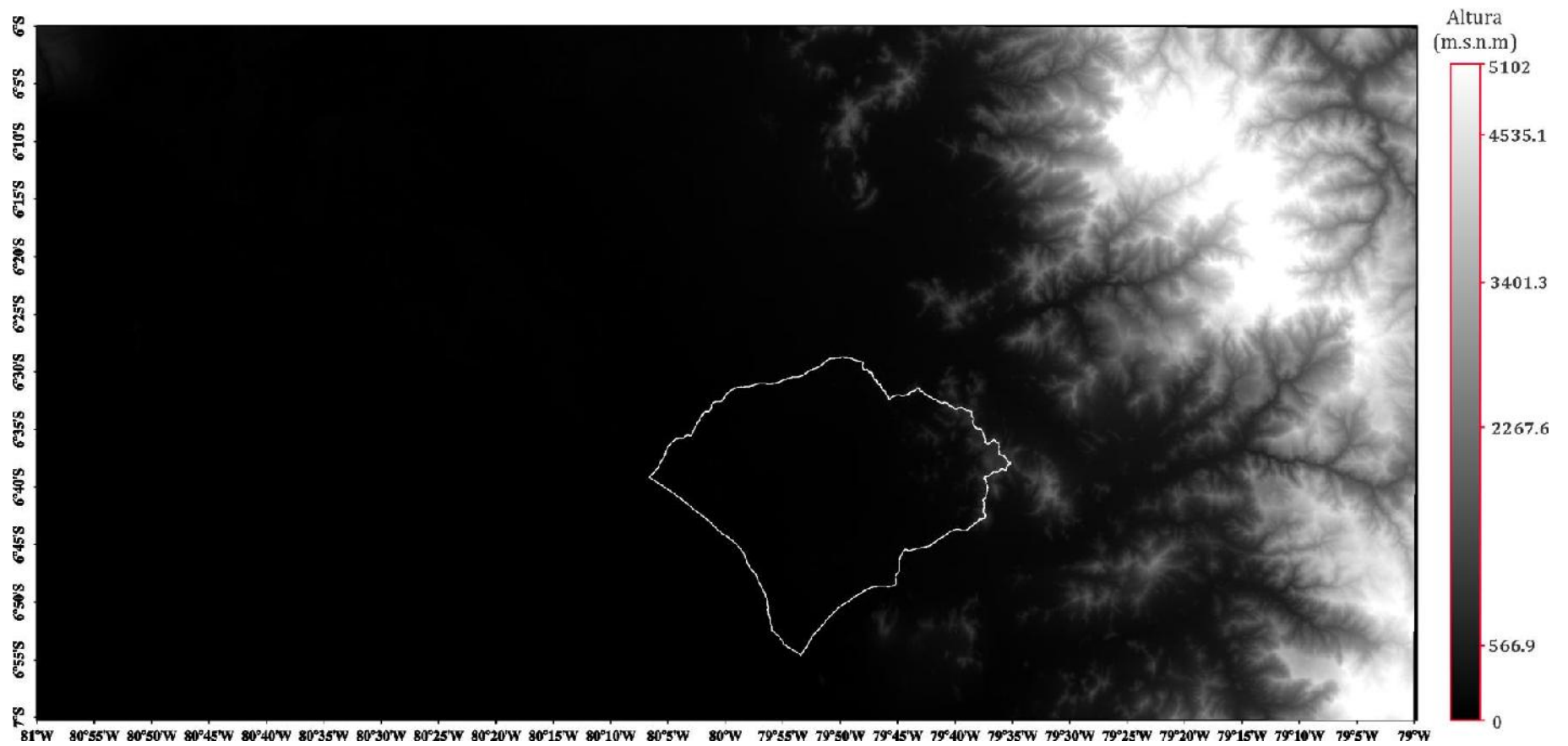
Fuente: Elaboración propia.

Un DEM es una estructura numérica de datos acotados que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Un terreno real puede describirse en forma general

mediante una función de dos variables sin discontinuidad, del modo siguiente:

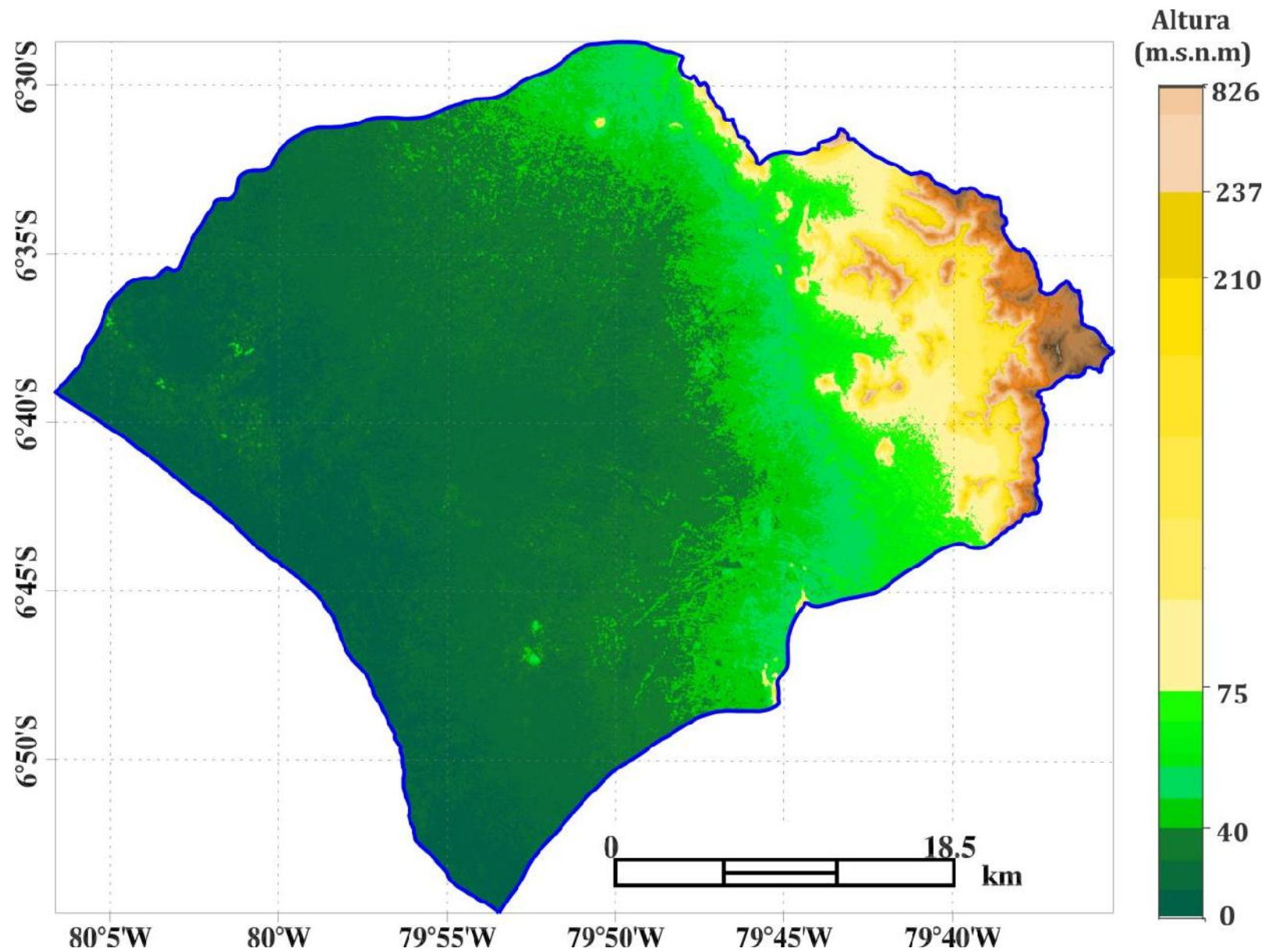
$$Z = \xi(x, y)$$

Donde “Z” representa la altitud del terreno en el punto coordenado  $(x, y)$  y  $\xi$  es una función que relaciona la variable con su localización geográfica. En un modelo de elevación digital la función  $\xi$  se aplica a un espacio concreto, “S”. En consecuencia la ecuación que se forma no es continua, su solución numérica se da a intervalos discretos [7], la ecuación será de la siguiente forma:  $DEM = (S, \xi)$ . En la Figura A.3, se muestra el modelo de elevación digital del terreno de la cuenca Chancay Lambayeque, intercuenca 137771, a partir de imágenes GDEM ASTER, con proyección: Geográfica Lat/Lon, datum: WGS84 y tamaño de pixel: 0,000278 grados ( $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ ), las imágenes se obtuvieron de la página web (<http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/> [Acceso: 5 de enero del 2019]), se utilizaron dos escenas S07W080 y S07W081, como se muestra en la Figura A.2.



**Figura A. 2.** Imagen GDEM ASTER, perteneciente a las escenas S07W080 y S07W081 (GDEM: Global Digital Elevation Model).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura A. 3.** Modelo de elevación digital de los terrenos de la cuenca Chancay Lambayeque, Intercuenca 137771, a partir de GDEM ASTER. Fuente: Elaboración propia.

### Anexo C. Datos In-situ de la producción, rendimiento y superficie cosechada de cultivos de arroz

**Tabla C. 1.** *Datos de superficie cosechada (ha) de cultivos de arroz en siete distritos dentro del área de estudio.*

distritos	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Lambayeque	11201	12894	12495	497	6940	6354	5726	6313	9365	8585	5085	7260	8110	6230
Pueblo Nuevo	2300	2550	2580	550	2400	2440	2500	2500	2590	2590	1985	2670	2575	1950
Ferreñafe	4500	4350	4500	900	4500	4970	4675	5120	5240	5610	3819	5190	5020	3775
Mochumí	8435	7702	7580	212	4525	4362	4680	4963	6155	6020	3940	5049	5620	4050
Picsi	1310	980	855	163	1818	1097	1330	1310	1550	1550	1459	1900	330	1445
José Leonardo Ortiz	300	860	2080	155	870	850	983	895	1076	1220	1031	1030	970	950
Pimentel	860	947	1190	225	1045	900	1226	1550	1560	1610	1520	1500	1330	1300

Fuente: OEEE – MINAGRI.

**Tabla C. 2.** *Datos de producción (tn) de cultivos de arroz en siete distritos dentro del área de estudio.*

distritos	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Lambayeque	98663	102759	102810	2083	58097	48638	48673	54775	65536	66541	36104	60374	67154	51779
Pueblo Nuevo	20536	20356	20994	1138	20568	18200	22970	23290	19474	19883	13516	27730	21173	13208
Ferreñafe	40335	34983	39522	1138	40426	38787	44248	48480	51273	43631	26544	54900	42331	27482
Mochumí	74223	60203	62597	954	38575	36118	39544	42583	42387	48960	28303	49479	44687	32179
Picsi	10480	7438	7266	899	15268	8331	10670	12720	14970	12439	10213	18088	2310	8092
José Leonardo Ortiz	2438	6852	17944	760	7204	6152	7372	8934	11078	9163	6785	9390	9050	6600
Pimentel	6960	6995	10192	1103	9218	6486	9250	15464	15770	13197	9990	13740	12080	9270

Fuente: OEEE – MINAGRI



**Tabla C. 3.** *Datos de rendimiento (kg/ha) de cultivos de arroz en siete distritos dentro del área de estudio.*

<b>distritos</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>
Lambayeque	8963	7970	8228	4191	8371	7655	8500	8677	6998	7751	7100	8316	8280	8311
Pueblo Nuevo	8929	7983	8137	2069	8570	7459	9188	9316	7519	7677	6809	10386	8223	6773
Ferreñafe	8963	8042	8783	1264	8984	7804	9465	9469	9785	7777	6951	10578	8432	7280
Mochumí	8799	7817	8258	4500	8525	8280	8450	8580	6887	8133	7184	9800	7951	7945
Picsi	8000	7590	8498	5515	8398	7594	8023	9710	9658	8025	7000	9520	7000	5600
José Leonardo Ortiz	8127	7967	8627	4903	8280	7238	7499	9982	10296	7511	6581	9117	9330	6947
Pimentel	8093	7386	8565	4902	8821	7207	7545	9977	10109	8197	6572	9160	9083	7131

Fuente: OEEE – MINAGRI.

**Anexo D. Valores de reflectancia espectral de las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7 de la imagen ETM+ 20/11/2007**

**Tabla D. 1.** *Extracción de los valores de reflectancia para las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 de la imagen ETM+ 20/11/2007.*

Columna y fila de la imagen		WGS 84 UTM Zona 17S		reflectancia de la imagen ETM+ (20/11/2007)						CE1:1 dS/m	
X	Y	este (m)	norte (m)	B1	B2	B3	B4	B5	B7	fecha	CEe
1241	355	633825	9275485	0,0900	0,1058	0,1258	0.1564	0,1900	0,1757	18/10/2007	0,990
1258	408	634335	9273895	0,0933	0,1147	0,1334	0.1749	0,2225	0,1965	18/10/2007	1,530
1138	428	630735	9273295	0,0979	0,1199	0,1429	0.1751	0,2160	0,1896	18/10/2007	2,385
1183	432	632085	9273175	0,0819	0,1003	0,1137	0.1677	0,1770	0,1445	18/10/2007	0,284
1235	450	633645	9272635	0,0876	0,1090	0,1260	0.1713	0,2127	0,1861	18/10/2007	0,807
738	982	618735	9256675	0,1005	0,1141	0,1330	0.1713	0,2095	0,2000	18/10/2007	2,835
695	960	617445	9257335	0,0869	0,1056	0,1257	0.1601	0,1932	0,1653	18/10/2007	0,302
690	950	617295	9257635	0,0839	0,1025	0,1206	0.1711	0,1900	0,1549	18/10/2007	0,367
718	956	618135	9257455	0,1058	0,1309	0,1548	0.2193	0,2451	0,2069	18/10/2007	6,400
748	997	619035	9256225	0,1057	0,1337	0,1524	0.2047	0,2387	0,2104	18/10/2007	6,755
742	1003	618855	9256045	0,0872	0,1058	0,1209	0.1638	0,2127	0,1861	18/10/2007	0,675
736	1009	618675	9255865	0,0818	0,1030	0,1161	0.1824	0,2062	0,1757	18/10/2007	4,265
908	239	625275	9264355	0,0922	0,1113	0,1331	0.1902	0,1933	0,1480	18/10/2007	4,210
911	239	625365	9264355	0,0867	0,1057	0,1208	0.1641	0,1803	0,1480	18/10/2007	3,091
913	239	625425	9264355	0,0974	0,1225	0,1403	0.1864	0,2127	0,1896	18/10/2007	4,685
914	237	625455	9264415	0,1001	0,1197	0,1427	0.1752	0,2127	0,1826	18/10/2007	4,315

915	235	625485	9264475	0,1001	0,1225	0,1403	0,1752	0,2160	0,1792	18/10/2007	6,140
917	234	625545	9264505	0,0974	0,1140	0,1378	0,1715	0,2095	0,1826	18/10/2007	3,795
916	238	625515	9264385	0,0946	0,1197	0,1378	0,1678	0,2062	0,1792	18/10/2007	5,355
917	239	625545	9264355	0,1083	0,1225	0,1476	0,1827	0,2127	0,1861	18/10/2007	7,535
917	237	625545	9264415	0,1001	0,1197	0,1378	0,1715	0,2095	0,1792	18/10/2007	4,660
919	233	625605	9264535	0,0976	0,1198	0,1379	0,1678	0,2095	0,1896	18/10/2007	2,975
918	232	625575	9264565	0,0948	0,1141	0,1354	0,1641	0,2030	0,1757	18/10/2007	4,355
920	236	625635	9264445	0,1029	0,1225	0,1378	0,1752	0,2127	0,1826	18/10/2007	5,020
920	238	625635	9264385	0,1056	0,1254	0,1476	0,1901	0,2322	0,2034	18/10/2007	6,975
925	233	625785	9264535	0,1057	0,1254	0,1452	0,1827	0,2192	0,1930	18/10/2007	4,965
927	236	625845	9264445	0,1055	0,1224	0,1426	0,1789	0,2127	0,1861	18/10/2007	3,640
929	228	625905	9264685	0,1054	0,1280	0,1475	0,1900	0,2224	0,2034	18/10/2007	5,885
906	243	625215	9264235	0,1027	0,1338	0,1573	0,2087	0,2646	0,2346	18/10/2007	7,280
904	254	625155	9263905	0,1133	0,1337	0,1597	0,2049	0,2419	0,2034	18/10/2007	6,995
892	258	624795	9263785	0,1054	0,1251	0,1523	0,1863	0,2192	0,1861	18/10/2007	5,640
853	266	623625	9263545	0,1080	0,1334	0,1547	0,1973	0,2387	0,1930	18/10/2007	5,065
823	365	622725	9260575	0,0796	0,0977	0,1115	0,1786	0,1965	0,1549	18/10/2007	1,855
809	373	622305	9260335	0,0770	0,0922	0,1019	0,1527	0,1544	0,1098	18/10/2007	2,435
799	383	622005	9260035	0,0821	0,1033	0,1188	0,1823	0,1835	0,1306	18/10/2007	2,050
805	377	622185	9260215	0,0741	0,0921	0,1091	0,1527	0,1544	0,1168	18/10/2007	1,735
847	378	623445	9260185	0,0832	0,0953	0,1120	0,1558	0,1609	0,1306	18/10/2007	3,085

856	380	623715	9260125	0,0805	0,0954	0,1096	0,1597	0,1673	0,1306	18/10/2007	3,455
648	455	617475	9257875	0,0926	0,1059	0,1209	0,1603	0,1868	0,1584	18/10/2007	2,040
642	464	617295	9257605	0,0784	0,0969	0,1132	0,1525	0,1835	0,1514	18/10/2007	0,737
901	238	625065	9264385	0,0837	0,1082	0,1255	0,1677	0,1868	0,1341	18/10/2007	1,760
903	237	625125	9264415	0,0782	0,0969	0,1084	0,1416	0,1543	0,1167	18/10/2007	1,145
908	237	625275	9264415	0,0812	0,0943	0,1061	0,1306	0,1478	0,1133	18/10/2007	1,745
909	236	625305	9264445	0,0730	0,0886	0,1012	0,1269	0,1414	0,1063	18/10/2007	1,315
911	237	625365	9264415	0,0757	0,0886	0,0964	0,1269	0,1446	0,1063	18/10/2007	1,005
873	264	624225	9263605	0,1052	0,1306	0,1522	0,1862	0,2192	0,1861	18/10/2007	3,065
638	520	617175	9255925	0,0709	0,0888	0,1014	0,1674	0,1608	0,1133	18/10/2007	1,225
619	516	616605	9256045	0,0951	0,1169	0,1355	0,1972	0,2516	0,2000	18/10/2007	5,970

Fuente: Elaboración propia

## Anexo E programas para el procesamiento de imágenes satelitales

### PROGRAMA 1 E.

#### Pro radiancia\_TM

```

;#####
;# NOMBRE DEL PROGRAMA: ND_A_RADIANCIA.PRO                                     #
;# PROPÓSITO: CONVERSIÓN DE NUMEROS DIGITALES                               #
;# A RADIANCIA ESPECTRAL DE IMAGENES TM Y ETM+                               #
;#####
; Ubica la ruta donde se encuentran las imágenes
B1=READ_TIFF('C:\Rodrigo\B1.tif',geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
B2=READ_TIFF('C:\Rodrigo\B2.tif',geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
B3=READ_TIFF('C:\Rodrigo\B3.tif',geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
B4=READ_TIFF('C:\Rodrigo\B4.tif',geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
B5=READ_TIFF('C:\Rodrigo\B5.tif',geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
B7=READ_TIFF('C:\Rodrigo\B7.tif',geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
openr, lun,'G:\IMAGENES LANDSAT-7-8\MTL.txt', /get_lun
header = strarr(140)
readf, lun, header
junk=""
lmax1=0.0
lmin1=0.0
lmax2=0.0
lmin2=0.0
lmax3=0.0
lmin3=0.0
lmax4=0.0
lmin4=0.0
lmax5=0.0
lmin5=0.0
lmax7=0.0
lmin7=0.0
reads, header(70), junk, lmax1, FORMAT='(A28,x,F8.3)'
reads, header(71), junk, lmin1, FORMAT='(A28,x,F8.3)'
reads, header(72), junk, lmax2, FORMAT='(A28,x,F8.3)'
reads, header(73), junk, lmin2, FORMAT='(A28,x,F8.3)'
reads, header(74), junk, lmax3, FORMAT='(A28,x,F8.3)'
reads, header(75), junk, lmin3, FORMAT='(A28,x,F8.3)'
reads, header(76), junk, lmax4, FORMAT='(A28,x,F8.3)'
reads, header(77), junk, lmin4, FORMAT='(A28,x,F8.3)'
reads, header(78), junk, lmax5, FORMAT='(A28,x,F8.3)'
reads, header(79), junk, lmin5, FORMAT='(A28,x,F8.3)'
;reads, header(80), junk, lmax6, FORMAT='(A16,x,F8.3)'
;reads, header(81), junk, lmin6, FORMAT='(A16,x,F8.3)'
reads, header(84), junk, lmax7, FORMAT='(A28,x,F8.3)'

```

```

reads, header(85), junk, lmin7, FORMAT='(A28,x,F8.3)'
print,lmax1,lmin1,lmax2,lmin2,lmax3,lmin3,lmax4,lmin4,lmax5,lmin5
QCalmax=255.0
QCalmin=1.0
gains1=(Lmax1-Lmin1)/(QCALmax-Qcalmin)
gains2=(Lmax2-Lmin2)/(QCALmax-Qcalmin)
gains3=(Lmax3-Lmin3)/(QCALmax-Qcalmin)
gains4=(Lmax4-Lmin4)/(QCALmax-Qcalmin)
gains5=(Lmax5-Lmin5)/(QCALmax-Qcalmin)
gains7=(Lmax7-Lmin7)/(QCALmax-Qcalmin)
bias1=Lmin1-gains1*QCalmin
bias2=Lmin2-gains2*QCalmin
bias3=Lmin3-gains3*QCalmin
bias4=Lmin4-gains4*Qcalmin
bias5=Lmin5-gains5*QCalmin
bias7=Lmin7-gains7*QCalmin
print,gains1,bias1,gains2,bias2,gains3,bias3,gains4,bias4
L1 = fltarr(2043,1690)
L2 = fltarr(2043,1690)
L3 = fltarr(2043,1690)
L4 = fltarr(2043,1690)
L5 = fltarr(2043,1690)
L7 = fltarr(2043,1690)
L1 = temporary(GAINS1*B1 + bias1)
L2 = temporary(GAINS2*B2 + bias2)
L3 = temporary(GAINS3*B3 + bias3)
L4 = temporary(GAINS4*B4 + bias4)
L5 = temporary(GAINS5*B5 + bias5)
L7 = temporary(GAINS7*B7 + bias7)
print,mean(l1)
; Guardando las imágenes de radiancia (L)
WRITE_TIFF, 'C:\Rodrigo\radiancia1.tif', L1, geotiff =
GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF, 'C:\Rodrigo\radiancia2.tif', L2, geotiff =
GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF, 'C:\Rodrigo\radiancia3.tif', L3, geotiff =
GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF, 'C:\Rodrigo\radiancia4.tif', L4, geotiff =
GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF, 'C:\Rodrigo\radiancia5.tif', L5, geotiff =
GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF, 'C:\Rodrigo\radiancia7.tif', L7, geotiff =
GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
print, 'Fin del Procesamiento'
end

```

**PROGRAMA 2 E.****Pro \_2014\_savgol\_rodrigo**

```

#####
;# NOMBRE DEL PROGRAMA: _2014_savgol_rodrigo.PRO #
;# PROPOSITO DEL PROGRAMA: #
;# MUESTRA LA SERIE TEMPORAL DE DATOS IMAGENES DE NDVI MODIS, #
;# FILTRA LOS DATOS ANOMALOS MEDIANTE EL FILTRO DE Savitzky- #
;# Golay (width 33, 4th degree). #
;# AL MISMO TIEMPO, GUARDA LA SERIE TEMPORAL CON LOS DATOS #
;# CORREGIDOS EN FORMATO ASCII. #
#####
filename='C:\Users\Rodrigo\Pueblo Nuevo\MARRON.txt'
nlines = FILE_LINES(filename); número de líneas del ascii
y=fltarr(nlines)
n=nlines
np=14
openr,lun,filename,/get_lun
readf,lun,y ;lectura de la data
free_lun,lun
;-----
; npf=3; Faltan 3 puntos del año 2000 debido a que no hay data
; valor_NaN=replicate(!values.f_nan, npf) ; se completa con
; NaN al inicio de la serie
t=FINDGEN(n);
n_pts_año=23 ; Número de puntos por año
año_ini=2001 ; año inicial
x1=t/n_pts_año+año_ini; generacion del eje x
y1=[y] ; se concatena a la data inicial eje y
;-----Aplicando el filtro SGL-----
; y2=[SMOOTH(y, 6, /EDGE_TRUNCATE)]
savgolFilter = SAVGOL(10, 10, 0, 19)
y3=[CONVOL(y, savgolFilter, /EDGE_TRUNCATE)]
;-----Graficando-----
P1=plot(x1,y1,name='Dato real (NDVI)',THICK=2,YTITLE='NDVI',
XTITLE='TIEMPO (Años)',dimensions=[1350,380],$
FONT_SIZE=12,MARGIN=[0.05, 0.25,0.05,0.05],XTICKV=[2001:2014],
yrange=[-1:1]);,XRANGE=[2001,2014],/FILL_BACKGROUND,
FILL_LEVEL=0)
;p2 = PLOT(x1,y2, /OVERPLOT, COLOR=[255, 0, 0], NAME='Smooth
(width 33)',THICK=2)
p3 = PLOT(x1, y3, /OVERPLOT,COLOR=[0, 0, 255], NAME='Savitzky-
Golay (width 33, 4th degree)',THICK=2)
l1=LEGEND(TARGET=[p1,p3],/NORMAL,/AUTO_TEXT_COLOR,
POSITION=[0.95,0.19])
;-----Guardando sin margenes-----
;p1.Save,"C:\Users\Rodrigo\Desktop\Carpetas\TESIS

```

```

DEFINITIVA\Tesis 2017\Apilado, maximo y minimo compuesto
UNPRG\Resultados\Pueblo Nuevo\MARRON.ps", BORDER=10,
RESOLUTION=150, /TRANSPARENT
OPENW, ID, 'C:\Users\Rodrigo\UNPRG\Resultados\Pueblo
Nuevo\MARRON.dat', /GET_LUN
PRINTF, ID, y3, FORMAT=' ('+STRTRIM(1)+'F8.4) '
; '('+STRTRIM(1)+'F8.6)' da formato a los valores digitales
; espaciado despues de la coma decimal.
CLOSE, ID
FREE_LUN, ID
end

```

### PROGRAMA 3E

```

PRO NDVI_TM_ETM
;#####
;# NOMBRE DEL PROGRAMA: NDVI_TM_ETM.PRO #
;# PROPOSITO: CÁLCULO DEL NDVI A PARTIR DE IMÁGENES DE #
;# REFLECTANCIA ESPECTRAL DE LOS SENSORES TM Y ETM+. #
;#####
dirname=dialog_pickfile(/directory,title="Seleccionar la carpeta
de las imagenes")
cd,dirname
file_mkdir, 'INDICE'
A=read_tiff('REFLECTANCIATOA_3.tif',geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
B=read_tiff('REFLECTANCIATOA_4.tif',geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
NDVI=temporary((B-A)/(B+A))
WRITE_TIFF,dirname+path_sep()+'INDICE'+path_sep()+'NDVI'+'.tif',
NDVI,geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY,/FLOAT
end

```

### PROGRAMA 4 E.

```

pro desviación_stándar
;#####
;# EL PROGRAMA CALCULA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR (USANDO N-1) #
;# DE UN APILADO DE IMÁGENES DEL SENSOR ETM+. #
;# EN EL CÁLCULO NO SE TOMAN EN CUENTA LOS PÍXELES O ÁREAS #
;# SIN DATOS, LOS CUALES DEBEN TENER VALOR CERO. #
;#####
TIC; mide el
tiempo de procesamiento del programa.
;----- RUTAS DE PROCESAMIENTO -----
file_input='F:\NDVI_INTERCUENCA'; cargar apilado
file_output='F:\STDEV_NDVI_INTERCUENCA'; archivo de salida
file_output1='C:\VALOR_MEDIO_NDVI_INTERCUENCA'; valor medio
;-----

```



```

envi_file_query, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb,
  data_type=data_type,file_type=file_type, dims=dims
pos=lindgen(nb)
imagen=fltarr(ns, nl, nb) ; array tridimensionaln
For i=0, nb-1 Do Begin
  imagen[:,*,i] = envi_get_data(fid=fid,dims=dims,pos=pos[i])
Endfor
;----- hallando los pixeles diferentes que cero -----
m=fltarr(ns,nl)
pp=fltarr(nb)
desviación_estándar=fltarr(ns,nl)
imagen_promedio=fltarr(ns,nl)
for j=0,nl-1 do begin
  for i=0,ns-1 do begin
    for k=0,nb-1 do begin
      pp(k)=imagen(i,j,k)
    endfor
    ;-----Encontrando los pixeles diferentes a cero-----
    B = WHERE(pp ne 0.0, count)
    m(i,j)=double(count)
    if (m(i,j) eq 0.0) then begin
      m(i,j)=double(nb)
    endif
    imagen_promedio(i,j)=total(pp)/m(i,j)
    ;-----Calculo de la desviación estándar-----
    suma2=0.0
    for h=0,N_ELEMENTS(B)-1 do begin
      suma2=suma2+(pp(B(h))-imagen_promedio(i,j))^2.0
    endfor
    desviacion_estandar(i,j)=sqrt((1.0/(N_ELEMENTS(B)-
      1))*suma2)
    imagen_promedio(i,j)=total(pp)/m(i,j)
    if (desviacion_estandar(i,j) ne desviacion_estandar(i,j))
then begin
      desviacion_estandar(i,j)=0.0
      if (imagen_promedio(i,j) ne imagen_promedio(i,j)) then
begin
        imagen_promedio(i,j)=0.0
      endif
    endif
  endfor
endfor
; SI SE DESEA CARGAR A LA MEMORIA DEL ENVI
map_info = envi_get_map_info(fid=fid)
;ENVI_ENTER_DATA,desviacion_estandar,
  map_info=map_info,file_type=file_type, descrip=descrip ;;va
  a memory 1

```

```

;-----Guardando en un archivo-----
fname=file_output
openw,unit,fname,/get_lun
writeu,unit,desviacion_estandar
free_lun,unit
envi_setup_head,fname=fname,ns=ns,nl=n1,nb=1,interleave=0,data_type=4,offset=0,$
    map_info=map_info,/write,/open
    fname=file_output
    openw,unit,fname,/get_lun
    writeu,unit,imagen_promedio
    free_lun,unit
envi_setup_head,fname=fname,ns=ns,nl=n1,nb=1,interleave=0,data_type=4,offset=0,$
    map_info=map_info,/write,/open
    fname=file_output1
    print, 'FIN DE PROCESAMIENTO'
    TOC
end

```

## PROGRAMA 5 E.

```

pro create_composite_define_buttons, buttonInfo
;#####
;# NOMBRE DEL PROGRAMA: create_composite_define_buttons.pro      #
;# PROPOSITO: OTENER EL VALOR PROMEDIO, MAXIMO Y MINIMO VALOR    #
;# COMPUESTO DEL NDVI DE UNA SERIE TEMPORAL DE IMÁGENES        #
;# SATELITALES.                                                  #
;#####
compile_opt idl2
envi_define_menu_button, buttonInfo, value = 'Create Composite',
event_pro='create_composite', POSITION='last', ref_value = 'Basic
Tools',uvalue='Create Composite'
end
pro composite_functions, fid, pos, max_val=max_val,
min_val=min_val, mean_val=mean_val
compile_opt idl2
envi_file_query, fid, ns=ns, nl=n1, nb=n1, data_type=dt,
dims=dims
inherit = envi_set_inheritance(fid, dims, /spatial)
output_file = dialog_pickfile(title='Select Output File Name and
Location')
if output_file eq '' then return
openw, lun, output_file, /get_lun
if keyword_set(max_val) then begin
envi_report_init, title='Maximum Value Composite Image
Creation',['Accessing data from original file...','Creating
Composite Image...'],base=base, /interrupt

```

```

envi_report_inc, base, nl-1
for i=0, nl-1 do begin
envi_report_stat, base, i, nl-1, cancel=cancel
if cancel eq 1 then begin
envi_report_init, base=base, /finish
free_lun, lun
file_delete, output_file
return
endif
slice = envi_get_slice(fid=fid, line=i, pos=pos, xs=0, xe=ns-1,
/bip)
for j=0, ns-1 do begin max_value = max(slice[:,j])
writeu, lun, max_value
endfor
endfor
envi_report_init, base=base, /finish
envi_setup_head, inherit=inherit, nb=1, data_type=dt,
fname=output_file,interleave=0, ns=ns, nl=nl, offset=0, /write
endif
if keyword_set(min_val) then begin
envi_report_init, title='Minimum Value Composite Image Creation',
['Accessing data from original file...','Creating Composite
Image...'], base=base, /interrupt
envi_report_inc, base, nl-1
for i=0, nl-1 do begin
envi_report_stat, base, i, nl-1, cancel=cancel
if cancel eq 1 then begin
envi_report_init, base=base, /finish
free_lun, lun
file_delete, output_file
return
endif
slice = envi_get_slice(fid=fid, line=i, pos=pos, xs=0, xe=ns-1,
/bip)
for j=0, ns-1 do begin
min_value = min(slice[:,j])
writeu, lun, min_value
endfor
endfor
envi_report_init, base=base, /finish
envi_setup_head, inherit=inherit, nb=1, data_type=dt,
fname=output_file, interleave=0, ns=ns, nl=nl, offset=0, /write
endif
if keyword_set(mean_val) then begin
envi_report_init, title='Mean Value Composite Image Creation',
['Accessing data from original file...','Creating Composite
Image...'], base=base, /interrupt

```

```

envi_report_inc, base, nl-1
for i=0, nl-1 do begin
envi_report_stat, base, i, nl-1, cancel=cancel
if cancel eq 1 then begin
envi_report_init, base=base, /finish
free_lun, lun
file_delete, output_file
return
endif
slice = envi_get_slice(fid=fid, line=i, pos=pos, xs=0, xe=ns-1,
/bip)
slice = float(slice)
for j=0, ns-1 do begin
mean_value = mean(slice[:,j])
writeu, lun, mean_value
endfor
endfor
envi_report_init, base=base, /finish
envi_setup_head, inherit=inherit, nb=1, data_type=4,
fname=output_file, interleave=0, ns=ns, nl=nl, offset=0, /write
endif
free_lun, lun
envi_open_file, output_file
end
pro create_composite, event
compile_opt idl2
envi_select, fid=input_fid, /file_only, pos=pos, title='Select
Input File for Composite Generation', /no_dims
if (input_fid[0] eq -1) then return
base = widget_auto_base(title='Type?')
list = ['Minimum Value', 'Maximum Value', 'Mean Value']
choice = widget_menu(base, list=list, /excl, /auto,
uvalue='choice', rows=3)
result = auto_wid_mng(base)
if (result.accept eq 0) then return
if result.choice eq 0 then begin composite_functions, input_fid,
pos, /min_val
endif
if result.choice eq 1 then begin composite_functions, input_fid,
pos, /max_val
endif
if result.choice eq 2 then begin
composite_functions, input_fid, pos, /mean_val
endif
end

```